

Resumen

El proyecto tiene como objetivo el análisis morfológico y de propiedades mecánicas de placas de polipropileno con fibra de vidrio (PP-GF30) y de policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno (PC/ABS), inyectadas mediante microespumación física (MuCell®).

Este proyecto se enmarca dentro de un estudio más amplio que tiene como objetivo la comparación entre dos métodos de espumado físico mediante moldeo por inyección: el proceso MuCell® y un nuevo proceso del grupo Volkswagen AG, que se encuentra en desarrollo.

Una de las principales ventajas que presentan estos materiales microespumados es la reducción de peso, cualidad importante dentro del sector de la automoción y relacionada directamente con el consumo de los vehículos y con las emisiones que éstos emiten.

Para la realización del PFC, se parte de placas macizas y microespumadas con diferentes espesores, inyectadas en una inyectora equipada con el sistema de suministro de fluido supercrítico (SCF) MuCell®. Para la realización de los análisis tanto morfológico (densidad celular, diámetro de celdas y proporción entre piel maciza y núcleo espumado) como mecánico (tracción, flexión e impacto), se preparan y caracterizan probetas de los diferentes materiales con las diferentes condiciones de inyección.

En el análisis morfológico ha podido observarse como en todas las placas espumadas están presentes dos zonas: una piel maciza y un núcleo espumado. La densidad celular y el tamaño de celda varían en función de las condiciones de espumación. Además en el PC/ABS, se observa en las zonas más próximas a la piel maciza, orientación celular en la dirección del flujo de inyección.

En cuanto a la caracterización mecánica, se ha constatado que la espumación provoca un aumento en la anisotropía del material, teniendo una afectación mayor sobre la dirección perpendicular al flujo de inyección. Aunque de las propiedades mecánicas analizadas, la propiedad que mayor disminución experimenta es la resistencia al impacto, también se han observado disminuciones de resistencia a la tracción y a la flexión, así como de los respectivos módulos. Sin embargo en el análisis realizado, no se ha observado pérdida de propiedades en cuanto a deformaciones de tensión o de flexión. También se confirma, que la densidad del material espumado se encuentra directamente relacionada con la pérdida de propiedades mecánicas de éste.

Índice

RESUMEN	1
ÍNDICE	3
1. PREFACIO	7
1.2. Origen del proyecto	7
1.3. Motivación	7
1.4. Requerimientos previos	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Objetivos del proyecto	9
2.2. Alcance del proyecto	9
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Tecnología de materiales	10
3.1.1. Teoría de plásticos	10
3.1.2. Materiales celulares	13
3.2. Microespumación	17
3.2.1. Agente espumante	17
3.2.2. Inyección de espumas microcelulares – Proceso MuCell®	18
3.2.3. Proceso Core-Back	21
3.2.4. Influencia de los parámetros de inyección en las celdas	22
3.2.5. Microespumación de polímeros reforzados con carga	23
3.2.6. Ventajas e inconvenientes de la microespumación con MuCell®	24
3.3. Plásticos en el sector de la automoción	25
3.3.1. Estado del arte	25
3.3.2. Posibilidades de reducción de peso en vehículos	27
3.3.3. Ventajas de la reducción de peso en vehículos	28
4. MATERIALES Y PROCESADO	29
4.1. Descriptiva de material	29
4.1.1. Policarbonato/Acrilonitrilo butadieno estireno	29
4.1.2. Polipropileno cargado con fibra de vidrio	29
4.1.3. Agente espumante – Nitrógeno	30
4.2. Inyección de placas	30
4.2.1. Proceso de inyección	30
4.2.2. Parámetros de inyección	32

5. MÉTODOS EXPERIMENTALES	33
5.1. Acondicionamiento de probetas	33
5.2. Inspección visual	35
5.2.1. Probetas	35
5.2.2. Ejecución del ensayo	35
5.3. Caracterización morfológica	35
5.3.1. Probetas	35
5.3.2. Ejecución del ensayo	36
5.3.3. Cálculo y expresión de los resultados	37
5.4. Densidad aparente	38
5.4.1. Probetas	38
5.4.2. Ejecución del ensayo	38
5.4.3. Cálculo y expresión de los resultados	39
5.5. Caracterización mecánica - Ensayos de tracción	39
5.5.1. Probetas	39
5.5.2. Ejecución del ensayo	39
5.5.3. Cálculo y expresión de los resultados	40
5.6. Caracterización mecánica - Ensayos de flexión	42
5.6.1. Probetas	42
5.6.2. Ejecución del ensayo	43
5.6.3. Cálculo y expresión de los resultados	43
5.7. Caracterización mecánica - Ensayos de impacto	44
5.7.1. Probetas	44
5.7.2. Ejecución del ensayo	45
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN MATERIAL PC/ABS (BAYBLEND® T65XF)	48
6.1. Inspección visual	48
6.2. Caracterización morfológica	50
6.2.1. Espesor de piel	54
6.2.2. Estudio de celdas	55
6.3. Densidad aparente	57
6.4. Caracterización mecánica – Ensayos de tracción	59
6.5. Caracterización mecánica – Ensayos de flexión	63
6.6. Caracterización mecánica – Ensayos de impacto	66
6.7. Propiedades específicas	69
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN MATERIAL PP-GF30 (SABIC STAMAX RESIN 30YM240)	71

7.1. Inspección visual	71
7.2. Caracterización morfológica.....	73
7.2.1. Espesor de piel	76
7.2.2. Estudio de celdas	77
7.3. Densidad aparente	78
7.4. Caracterización mecánica - Ensayos de tracción	79
7.5. Caracterización mecánica - Ensayos de flexión	83
7.6. Caracterización mecánica - Ensayos de impacto.....	85
7.7. Propiedades específicas	88
CONCLUSIONES	91
AGRADECIMIENTOS	93
BIBLIOGRAFÍA.....	95
ANEXOS	99
A. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL.....	99
B. PRESUPUESTO	102

1. Prefacio

1.2. Origen del proyecto

El proyecto que nos ocupa, surge como colaboración a la tesis doctoral “Caracterización de plásticos microcelulares para la reducción de peso en piezas interiores de automoción”, del doctorando Javier Gómez Monterde. La tesis se enmarca dentro de la Prueba Piloto del Programa de Doctorat Industrial, convocada en 2013 por la Generalitat de Catalunya y se está llevando a cabo en la empresa de automóviles SEAT, en colaboración con la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) y el *Centre Català del Plàstic* (CCP).

Actualmente, la reducción de peso en el sector de la automoción, se encuentra dentro los principales objetivos, ya que implica una reducción en los consumos y por lo tanto, en las emisiones emitidas por los vehículos.

1.3. Motivación

Tras haber dedicado algunos años profesionales, tanto al análisis como al desarrollo de tecnologías de los materiales, y afrontar ahora un nuevo reto profesional dentro del ámbito del desarrollo de piezas para el interior del habitáculo, he considerado que la opción de estudiar una tecnología de fabricación de materiales plásticos, que permite reducir el peso de las piezas dentro del sector de la automoción, era una muy buena opción para conjugar mi trayectoria profesional, con mis inquietudes y mis conocimientos académicos.

1.4. Requerimientos previos

Para poder llevar a cabo este proyecto ha sido necesario disponer de las placas de los diferentes materiales con las diferentes condiciones de inyección, fabricadas por el proveedor de materiales Covestro AG en Leverkusen, Alemania (anteriormente conocida como Bayer MaterialScience).

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo general de la tesis doctoral con la que se realiza la colaboración es la comparación entre dos métodos de espumado físico mediante moldeo por inyección: el proceso MuCell® y un proceso del grupo Volkswagen AG, que se encuentra aún en desarrollo.

El objetivo principal de este PFC es la caracterización de placas de dos materiales (PP-GF30 y PC/ABS), fabricadas mediante el proceso MuCell® a diferentes condiciones de inyección.

Para ello se llevan a cabo las siguientes etapas:

- Preparación de probetas.
- Inspección visual.
- Análisis morfológico de las diferentes placas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y análisis de imagen.
- Determinación de las propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción, flexión e impacto.

2.2. Alcance del proyecto

El proyecto parte de placas de los dos materiales, tanto macizas como microespumadas.

De los dos materiales se caracterizan placas macizas. Del material PC/ABS se caracterizan placas espumadas de 3 y 3,3 mm de espesor y del PP-GF30 de 3, 3,3 y 3,7 mm. Aunque el PC/ABS también intentó inyectarse en 3,7 mm, el molde no llenaba correctamente con este espesor de placa.

3. Marco teórico

3.1. Tecnología de materiales

3.1.1. Teoría de plásticos

3.1.1.1. Policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno

El Policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno (PC/ABS), se clasifica dentro de los plásticos como polímero compuesto y dentro de éstos, se describe como un *blend* de dos polímeros, el PC y el ABS. A este tipo concreto de polímeros también se les conoce como aleaciones.

Este tipo de polímeros son completamente diferentes a los copolímeros, donde dos o más monómeros se conectan en una cadena polimérica. Los *blends* son normalmente utilizados para combinar las propiedades de dos polímeros diferentes. En el caso del PC/ABS, los dos monómeros no se mezclan a nivel molecular, sino que forman un sistema de dos fases. Donde el ABS aporta sus buenas propiedades en cuanto a procesabilidad y el PC sus buenas propiedades mecánicas. Tanto el PC como el ABS son polímeros amorfos y la mezcla, también lo es.

Las propiedades más destacadas de este material son [1]:

- Densidad: 1,11 – 1,16 g/cm³
- Propiedades mecánicas: ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del material PC/ABS [2]

Módulo de Young	2100 – 2400 MPa
Alargamiento de rotura en tracción	45 %
Fuerza de rotura	45 – 55 MPa
Módulo de flexión	1800 – 2400 MPa

- Propiedades térmicas: Su temperatura de flexión bajo carga (HDT) está entre los 95°C y los 125°C, la de transición vítrea del ABS se encuentra sobre los 110 °C, mientras que la del PC, cerca de los 150 °C. Por lo tanto, la temperatura máxima de

uso del PC/ABS estará dentro de este rango. Será más o menos elevada dependiendo del ratio de ABS y PC que incorpore el *blend*.

- Resistencia química: como la mayoría de polímeros amorfos, la resistencia química no es una de sus mejores propiedades. Son compatibles con las grasas y las ceras pero los aceites y los solventes orgánicos, atacan químicamente al polímero de forma severa.
- Baja absorción de humedad.
- Facilidad de procesado en inyección por moldeo, moldeo por soplado, extrusión y termoconformado.
- Baja contracción.
- Excelente tolerancia dimensional.
- Color y superficie: material no transparente, color crema. Es un material que se puede colorear.

Y sus aplicaciones principales son las siguientes:

- Automoción: paneles de instrumentos, rejillas, revestimientos interiores y exteriores.
- Telecomunicaciones: teléfonos móviles.
- Sector médico: armazones/carcasas de equipamiento electrónico.
- Sector eléctrico/electrónico: armazones/carcasas de equipamiento electrónico, equipamiento de medición, interruptores y enchufes, discos de almacenaje.
- Equipamiento de oficina: carcasas de ordenadores, fotocopiadoras e impresoras.
- Electrodomésticos: carcasas de microondas y componentes de lavavajillas y secadoras.
- Usos varios: láminas transparentes, botellas y envases.

3.1.1.2. Polipropileno con fibra de vidrio

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico semicristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Pertenece al grupo de las poliolefinas.

Las propiedades más destacadas del PP sin carga son [1]:

- Densidad: 0,9 g/cm³.
- Propiedades mecánicas: Sus propiedades mecánicas dependen en gran medida de su estructura molecular, de su cristalinidad y de su orientación (ver Tabla 3.2). Presenta muy buena resistencia a la fatiga.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material PP [1] y [3]

Módulo de Young	1100 – 1300 MPa
Alargamiento de rotura en tracción	20 - 800 %
Fuerza de rotura	21 - 37 MPa
Módulo de flexión	1400 MPa
Resistencia al impacto Charpy	Sin entalla: Sin rotura Con entalla: 3 ÷ 17 kJ/m ²

Gracias a la utilización de agentes de adhesión en el polipropileno reforzado con fibra de vidrio (GF), es posible una mejora de sus propiedades mecánicas (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas del material PP-GF30 [1] y [4]

Módulo de Young	6200 MPa
Alargamiento de rotura en tracción	3 %
Fuerza de rotura	80 MPa
Módulo de flexión	6000 MPa
Resistencia al impacto Charpy	Sin entalla: 22 kJ/m ² Con entalla: 6 kJ/m ²

- Propiedades térmicas: El PP homopolímero, se vuelve frágil a bajas temperaturas (entorno a los 0°C). Su temperatura de fusión se encuentra entorno a los 160 – 170 °C, por lo que la temperatura máxima de uso continuado está sobre los 100°C (140°C en punta) y la de transición vítrea en -10°C.

- Resistencia química: excelente resistencia frente a ácidos y álcalis diluidos, acetonas, ésteres y agua caliente. Por el contrario, no presenta esta resistencia frente a carburantes ni frente a hidrocarburos aromáticos.
- Poca estabilidad dimensional debido a su gran contracción.

En función del tipo y la cantidad de carga que se le aplique al PP, sus propiedades y aplicaciones varían.

El PP sin carga tiene una amplia variedad de aplicaciones:

- Envases para alimentos y films protectores de alimentos.
- Equipamiento de laboratorio.
- Sector de la automoción: material del cual se fabrican componentes tanto del interior (por ejemplo revestimientos) como del exterior del habitáculo (por ejemplo parachoques o pasaruedas).

A las cuales, cuando se carga el polímero con fibra de vidrio, se pueden añadir los recubrimientos de electrodomésticos, aplicaciones específicas eléctricas/electrónicas y piezas con mayores exigencias técnicas para los automóviles.

3.1.2. Materiales celulares

Los materiales poliméricos celulares son aquellos que contienen dentro de su conformación un mínimo de dos fases correctamente definidas, la fase sólida de matriz polimérica y la gaseosa conformada por celdas derivadas del agente espumante (Figura 3.1). Para lograr esta estructura, se introduce en el polímero fundido, un agente espumante de carácter físico o químico, éste se dispersa en el polímero, y genera celdas. Estas celdas expanden el material al aumentar su diámetro, hasta que se estabilizan por efectos de la viscosidad del polímero, el volumen libre de la cavidad y el enfriamiento del molde (ver Figura 3.2, el proceso de microespumación, se explicará con más detenimiento en el apartado 3.2).

Estos materiales presentan ventajas en cuanto a su procesamiento. Permiten reducir la cantidad de material polimérico utilizado y aumentar las velocidades de producción en los procesos de conformado, lo que genera una reducción de costes. Sin embargo, la selección de la matriz polimérica, así como las adecuaciones de las piezas para ser inyectadas con materiales celulares (modificaciones geométricas, espesores, etc.) son de elevada importancia para poder sustituir a un material macizo, sin comprometer la

funcionalidad de la pieza. En la Figura 3.3 se puede observar la comparación de ciertas propiedades entre los materiales macizos y los materiales celulares

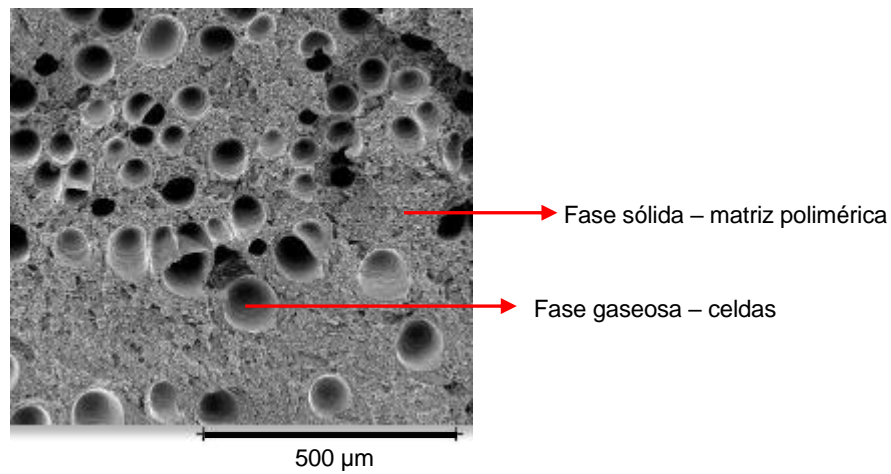


Figura 3.1. Fotomicrografía del material PC/ABS microespumado con un 10% de reducción de peso (aumento x50)

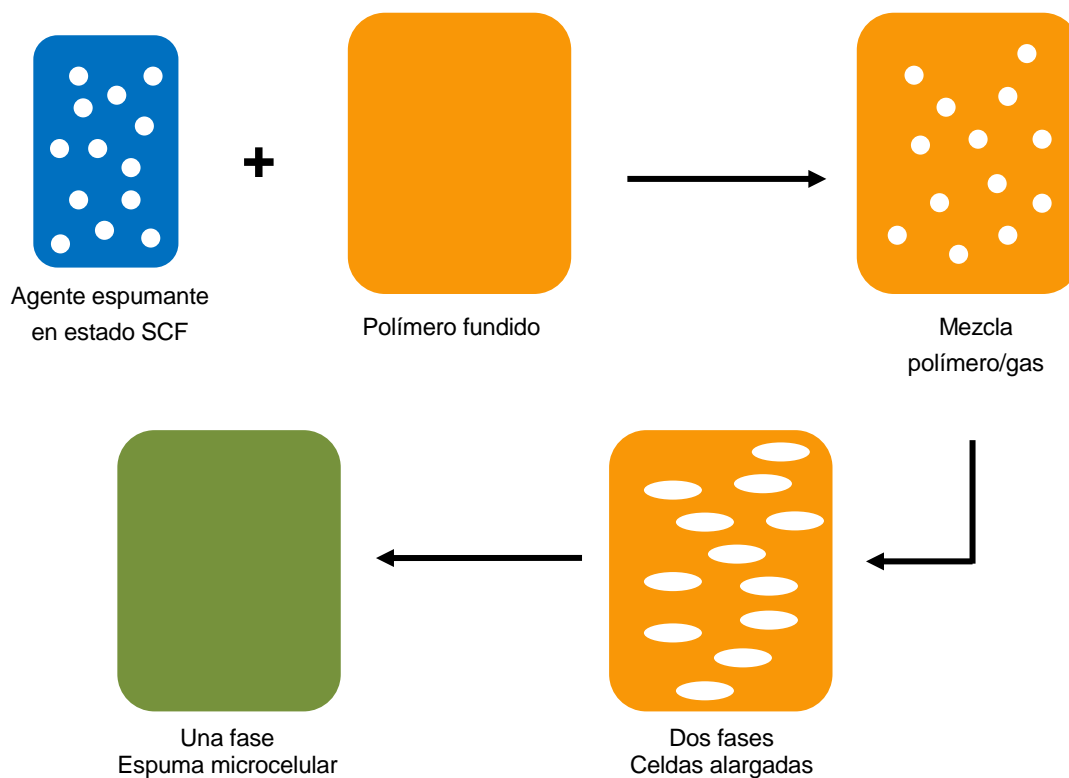


Figura 3.2. Esquema del proceso de difusión del gas en el polímero base (Modificado de [5])

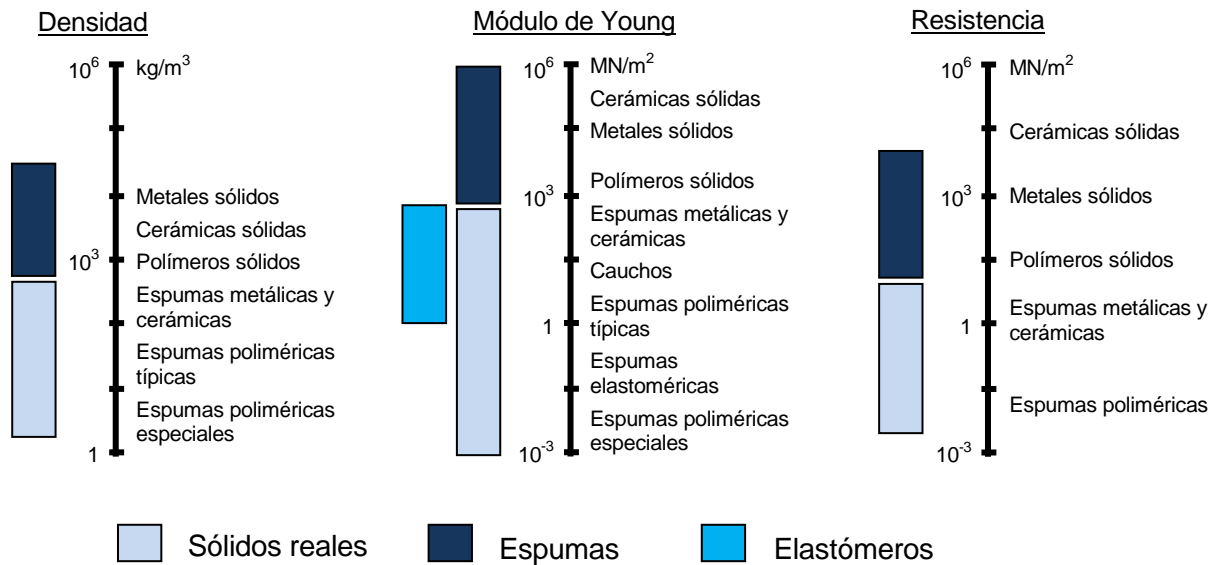


Figura 3.3. Comparativa de propiedades generales entre materiales macizos y materiales espumados (Basado en [6])

3.1.2.1. Densidad

Una de las propiedades más importantes de un material celular es su densidad aparente. Este parámetro describe la cantidad de material polimérico existente en la pieza por unidad de volumen. Para conocer su valor, debe efectuarse la medición real de las dimensiones de la pieza y medir el peso asociado a la misma. Con estos datos se aplica la ecuación 3.1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Dónde:

m: peso real [unidades de masa: g, kg, etc.]

V: volumen real de la pieza espumada [unidades de volumen: cm³, dm³, etc.]

Este parámetro tiene una relación inversamente proporcional a la cantidad de gas o celdas existentes en la pieza final.

3.1.2.2. Características de las celdas

Las propiedades de los materiales celulares dependen en gran medida del tipo de celda que presentan, éstas pueden ser abiertas o cerradas (Figura 3.4).

Celda abierta: carecen de pared celular y por ello el gas circula libremente de una celda a otra. Este tipo de celda presenta mayor absorción de humedad y sonido, mayor permeabilidad a los gases y peores propiedades aislantes.

Celda cerrada: dentro de sus paredes contienen gas y en ocasiones esta morfología puede estar interconectada. La gran mayoría de las espumas pertenecen a este tipo.

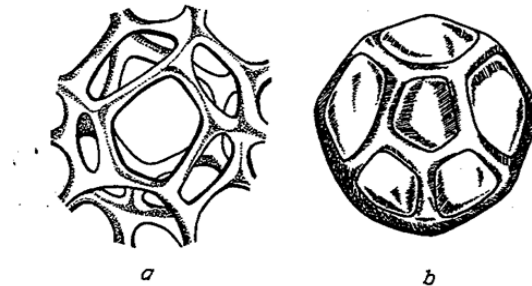


Figura 3.4. Ejemplos de tipos de celdas que pueden darse en un material celular:
a) celda abierta; b) celda cerrada [6]

Mediante el proceso de nucleación y expansión de celdas en la matriz polimérica (se explicaran en más detalle en el apartado 3.2.2), se genera la estructura celular. Durante la expansión celular, dicha estructura va cambiando. En el caso de las matrices poliméricas, inicialmente se dispersan por la matriz líquida pequeñas celdas con forma esférica. A medida que estas celdas se expanden, a causa del empaquetamiento, va disminuyendo la densidad celular. Posteriormente, la composición de celdas esféricas comenzará a derivar en estructuras poliédricas, similares a dodecaedros pentagonales (ver Figura 3.5). Después, por efecto de la tensión superficial y la viscosidad del material, este fluye hacia las intersecciones para formar aristas de sección transversal de tres puntas [7].

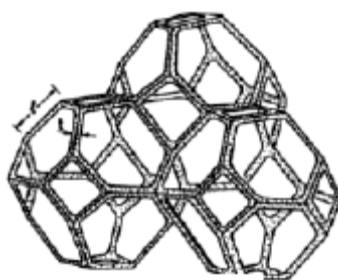


Figura 3.5. Esquema de celdas con forma de dodecaedro pentagonal [8]

La etapa final puede involucrar la ruptura de la pared celular, lo que hará que la espuma sea una espuma de celda abierta. Así, dependiendo del grado de expansión y de la formulación específica, la espuma podrá presentar una estructura celular de celda abierta, cerrada o interconectada.

3.2. Microespumación

3.2.1. Agente espumante

Como ya se adelantaba en el apartado 3.1.2, los polímeros espumados se fabrican mediante la introducción de un agente espumante en el polímero en estado fundido. Esto permite que se generen y se dispersen una serie de celdas en el polímero.

Los agentes espumantes pueden ser de tipo físico (AEF) o químico (AEQ).

Para la selección del agente espumante, deben tenerse en cuenta algunas precauciones, sobre todo por lo que respecta al medioambiente. El efecto sobre la capa de ozono, el efecto invernadero y su toxicidad durante el proceso.

Respecto a la efectividad del agente, uno de los puntos más importantes es su solubilidad en el polímero base. Una buena solubilidad, permite una reducción de la presión mínima de fundido para mantener al agente en solución. También permite la reducción de la temperatura de proceso, facilitando el enfriamiento y permitiendo así una optimización del ciclo.

Por el contrario, para un agente con menor solubilidad en el polímero, se requerirán mayores temperaturas y presiones, lo que puede provocar una degradación del polímero.

Los AEF proveen el gas que se expandirá en el polímero por medio del cambio de estado físico, los más comunes son el dióxido de carbono (CO_2) y el nitrógeno (N_2). Entre otras razones, por no ser tóxicos, por ser de disolución rápida, por sus propiedades de no inflamabilidad, por su elevada auto-nucleación y por sus relativamente bajas temperaturas y presiones críticas [9].

El CO_2 es abundante, económico, se puede procesar en condiciones moderadas, se puede utilizar en diferentes estados y además, presenta una excelente solubilidad en la mayoría de los polímeros.

El N_2 presenta una menor solubilidad en los polímeros comunes y como consecuencia, se precisan presiones mayores de proceso. Se utiliza para la fabricación de espumas estructurales por su capacidad para producir celdas finas. Por lo general el N_2 se utiliza para espumar polímeros con altas viscosidades o bien para inyectar piezas de llenado difícil. Se producen espumas con mayor densidad celular y mayor tasa de expansión por unidad de volumen [10].

Por lo que hace referencia a los AEQ, son sustancias orgánicas o inorgánicas reactivas en estado sólido. Se agregan al polímero en la etapa inicial del proceso y se descomponen, en reacción exotérmica o endotérmica, liberando los gases que darán lugar a la estructura celular, por lo general CO_2 y N_2 . Las densidades típicas de las espumas producidas por este medio son de entre 400 y 800 kg/m^3 [10].

En este estudio el agente espumante empleado será el N_2 , que se empleará como agente espumante físico.

3.2.2. Inyección de espumas microcelulares – Proceso MuCell®

El proceso MuCell®, un proceso comercializado por la empresa Trexel Inc. (EEUU), es un proceso de espumado mediante moldeo por inyección, empleando agentes espumantes de tipo físico (ver Figura 3.6). Para que este proceso pueda llevarse a cabo, el equipo de inyección debe garantizar que tengan cabida las diferentes etapas de la espumación así como que sea posible la formación de la estructura celular.

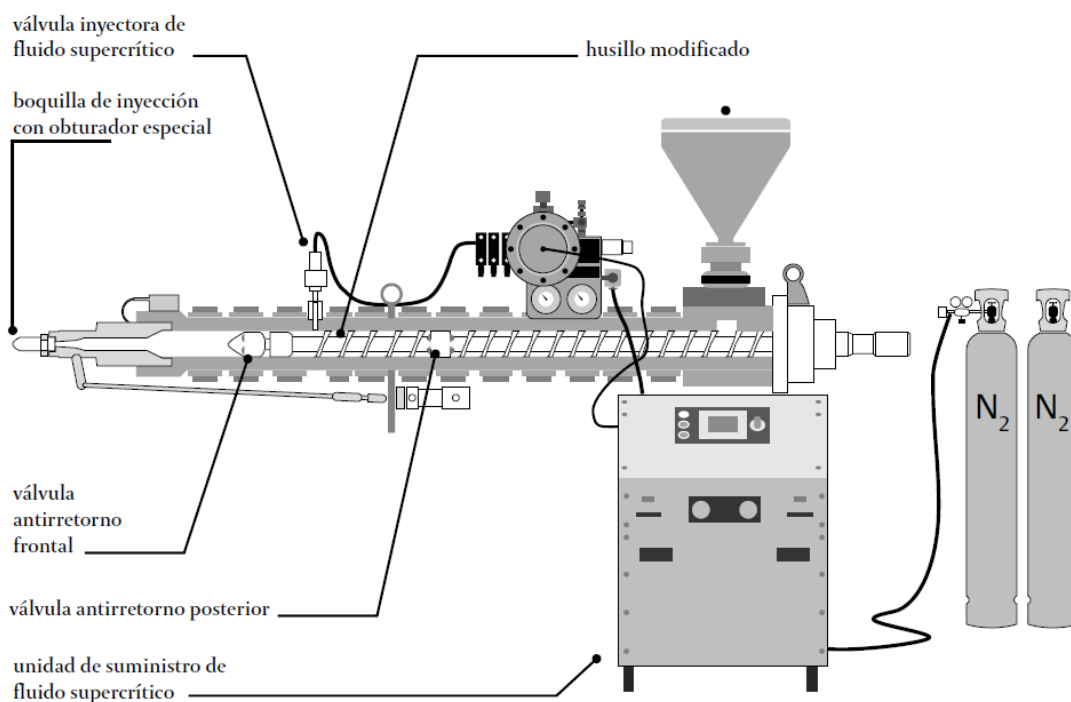


Figura 3.6. Esquema de una inyectora equipada con el sistema de suministro de fluido supercrítico MuCell® [10]

Para todo esto, una inyectora equipada con el sistema MuCell® presenta algunas diferencias con respecto a una inyectora convencional. En primer lugar, incorpora una unidad de suministro de fluido en estado supercrítico (SCF). Además, se modifica el diseño del husillo haciéndolo un poco más largo y modificando las zonas de alimentación, compactación y dosificación para facilitar el correcto mezclado entre el polímero y el gas. En el husillo, hay una válvula inyectora de fluido SCF, a él, se le agregan dos válvulas anti retorno de gas, una frontal y una en la parte posterior. Y para efectuar la inyección de la mezcla de material polímero/gas, una boquilla de inyección dotada con un obturador especial [10].

Las etapas de la espumación física son las siguientes:

Disolución del gas

En la etapa inicial, en la unidad de suministro de fluido supercrítico, el gas se presuriza hasta tenerlo en estado de fluido SCF (Figura 3.7). En este estado, el gas presenta una mayor solubilidad en el polímero base, una menor temperatura de transición vítrea, algunas propiedades del estado líquido, como una mayor densidad y algunas del estado gaseoso, su mayor fluencia y su menor viscosidad y tensión superficial [11].

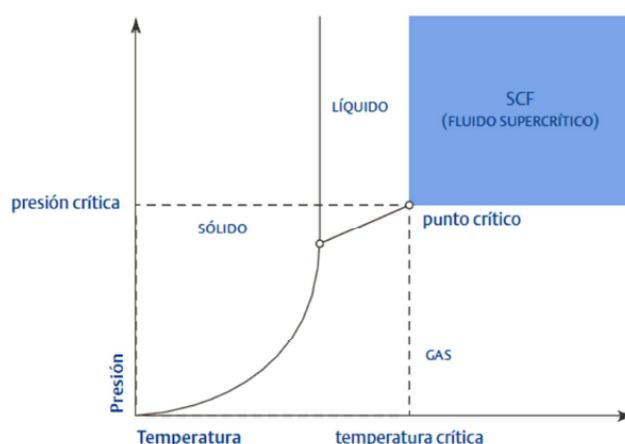


Figura 3.7. Diagrama de fases de un fluido en estado supercrítico [10].

Una vez que tenemos el agente espumante en este estado, se inyecta éste al comienzo del sistema de homogenización del tornillo de la inyectora, donde se mezclarán conformando una sola fase, el agente espumante y el polímero fundido. El gas se difunde y distribuye a lo largo del material en forma de gotas. Estas gotas se van alargando por el cilindro de plastificación debido a una deformación por cizallamiento provocada por la rotación del husillo. Las gotas alargadas se irán rompiendo formando multitud de gotas de gas más

pequeñas y pueden estabilizarse en los canales del husillo para formar celdas en la matriz de polímero fundido. Estas celdas, a su vez, se someten a la elongación con deformación por cizallamiento. El grado de cizallamiento varía en las diferentes capas del canal del husillo, lo que provoca que los tamaños de celda sean diferentes de la parte exterior a la parte interior del canal de flujo del husillo. Una vez que las gotas de gas se distribuyan uniformemente en la matriz de polímero fundido, tendremos una solución monofásica lista para nuclear.

Nucleación

El inicio de esta etapa viene marcado por una caída de presión a la entrada del molde (o a la salida de la boquilla) donde existe una sobresaturación de gas en la matriz polimérica. A consecuencia de esto, tiene lugar la formación de una segunda fase en el polímero fundido, donde se generan celdas iniciales, que atraen las moléculas de gas que se encuentren en sus cercanías. Cuanto más grande es la caída de presión, mayor es el número de celdas que se genera inicialmente.

Expansión

Las moléculas de gas atraídas por las celdas se unen a éstas puesto que la presión de la solución polímero/gas es mayor a la presión en el interior de las celdas. Cuando alcanzan un radio crítico, se estabilizan y empiezan a expandirse. Esta etapa se da durante el llenado del molde y la mezcla se mantiene caliente en la zona central de la cavidad. El proceso finaliza cuando las presiones se estabilizan o cuando el material solidifica, aunque también se encuentra limitado por el volumen de la cavidad del molde [12].

Estabilización

Los parámetros más importantes en esta etapa son la viscosidad y el comportamiento térmico de la matriz polimérica. De esta última etapa, depende la estabilidad de las paredes celulares, esto es de suma importancia en los materiales espumados, ya que normalmente éstos tienen tendencia a colapsar. La viscosidad debe permitir la expansión de las celdas y evitar el colapso de las mismas, mientras que la transferencia de calor debe ser la adecuada para que se produzca un rápido enfriamiento del material.

En la Figura 3.8, puede observarse una representación esquemática del proceso de solubilización del gas en el polímero.

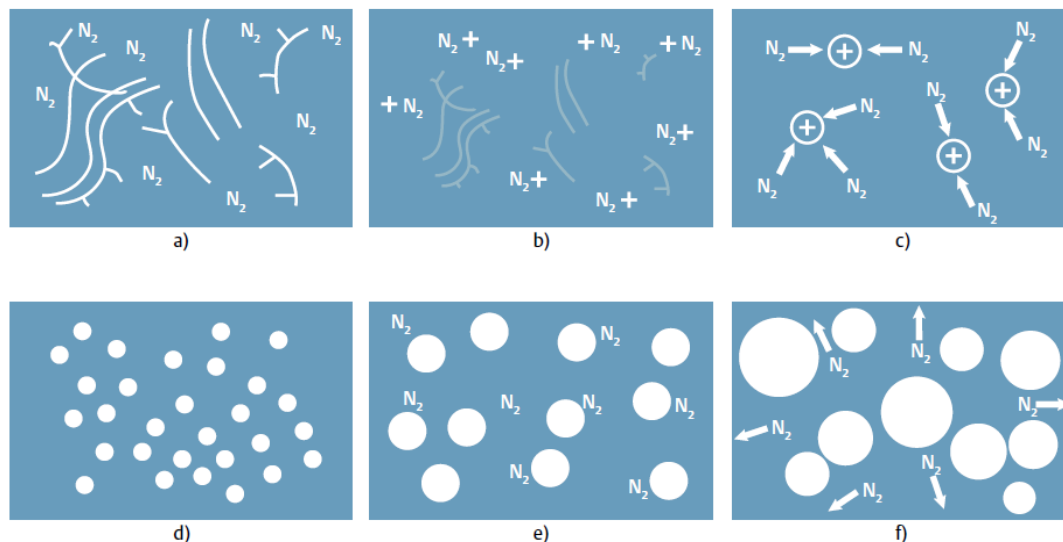


Figura 3.8. Representación esquemática de la solubilidad del gas en el polímero fundido: a) gas disuelto en el polímero; b) etapa de nucleación; c) migración del gas a los sitios de nucleación; d) crecimiento celular; e) enfriamiento y cese del crecimiento celular; y f) el gas excedente escapa a la atmósfera [10].

3.2.3. Proceso Core-Back

Recientemente el proceso MuCell® se ha combinado con tecnologías especiales de molde, tales como el proceso Core Back, para la consecución de ratios de expansión elevados con estructuras celulares uniformes [13]. El proceso Core-Back, es un proceso ligeramente diferente al proceso convencional de inyección de plásticos.

Primeramente, se inyecta la mezcla del material polimérico con el gas en estado supercrítico. Una vez inyectado éste en la cavidad, se produce mediante una corredera que retrocede, un rápido aumento de volumen de la cavidad (ver Figura 3.9).

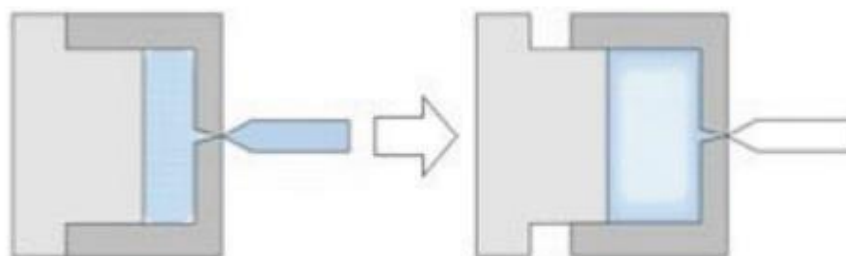


Figura 3.9. Esquema de un molde con Core-Back [14]

El rápido llenado de la cavidad con un reducido espesor tendría como consecuencia una caída de presión que no es suficiente para que se produzca la nucleación de celdas durante el llenado, por ello el aumento del volumen de la cavidad tras el llenado, genera una repentina caída de presión que favorece la formación de la estructura celular en el interior del polímero [13] y [14].

Una de las premisas principales para el proceso Core-Back es un diseño del molde que nos permita situar la línea de partición en una posición en la que el aumento de volumen de la cavidad se pueda llevar a cabo sin dejar salidas libres, puntos por los que se pueda perder material en estado fluido al efectuarse el movimiento de la corredera.

Además, la geometría de las piezas del molde debe permitir que la cavidad pueda ser ampliada mediante un movimiento lineal de alguno de los componentes. De lo contrario, será necesario introducir un sistema de correderas más complejo, que nos dificultaría significativamente el diseño del molde.

3.2.4. Influencia de los parámetros de inyección en las celdas

Los parámetros con mayor influencia sobre la estructura celular de polímeros semicristalinos y amorfos son [10]:

- Temperatura del fundido
- Temperatura del molde
- Velocidad de inyección
- Dosificación del agente espumante

A temperaturas de fundido elevadas, el agente espumante absorbe una mayor energía calorífica, la transforma en energía cinética y esto permite una mayor difusión y un mayor crecimiento de las celdas en un menor tiempo. Además de esto, una mayor temperatura de fusión también hace que la viscosidad del fluido sea menor y con esto, que la difusión y la expansión de las celdas en la cavidad se vea favorecida [15].

En referencia a la temperatura del molde, ésta también tiene una gran influencia sobre la morfología celular. Una baja temperatura del molde, provoca un choque térmico entre la masa fundida (polímero con agente espumante disuelto) y la superficie del molde. Esto, causa un enfriamiento brusco del material fundido y disminuye la fluidez del mismo. De esta manera, el material que está en contacto con la superficie metálica del molde, forma lo que llamamos una piel. A menor temperatura, se produce un mayor espesor de la piel y se

ralentiza la difusión del gas en la cavidad. Una temperatura de molde demasiado baja, frena la expansión del agente espumante y limita por tanto la reducción de densidad.

Por el contrario, si la temperatura del molde es demasiado elevada, el gas se difunde hacia el exterior, entre la cavidad del molde y la superficie de la pieza, cosa que puede provocar daños o defectos en la superficie del componente [16].

Por lo tanto, no se recomiendan temperaturas de molde extremas, aunque se ha podido observar que al aumentar la temperatura, además de favorecer ligeramente la nucleación, también se obtienen mayores tamaños de celda. Las temperaturas de molde bajas, permiten conservar la estructura celular en el frente del flujo, sin embargo, no favorece el control de la expansión celular en las otras zonas [10].

Respecto a la velocidad de inyección, cuanto ésta aumenta, obviamente disminuye el tiempo de llenado del molde y se produce una caída de presión. Todo esto provoca que se genere una mayor nucleación de celdas, pero se limita el tiempo de expansión, por lo que las celdas obtenidas son de tamaños menores [17].

Por lo que respecta a la dosificación del agente espumante, aunque existe una limitación por las dimensiones de la cavidad del molde, una mayor cantidad de agente espumante, propicia una producción de celdas mayor. Dependiendo de las dimensiones de la cavidad, éstas verán limitada su capacidad de expansión, por lo que si el volumen no es muy grande, la pieza final obtenida mostrará una estructura con una gran cantidad de celdas pero de menor tamaño [11] y [15].

3.2.5. Microespumación de polímeros reforzados con carga

Las piezas reforzadas con carga, presentan en general una mejor estructura celular que la estructura celular de los materiales no reforzados. Las piezas reforzadas con fibra de vidrio, inyectadas mediante la tecnología de microespumación, muestran que la fibra se mantiene siempre en las paredes de las celdas, es decir, que las celdas son creadas alrededor de las fibras y por lo tanto, éstas quedan bien fijadas a la matriz polimérica [11].

Puesto que las propiedades de los moldeados de los polímeros compuestos varían según las condiciones de procesado y la cantidad de carga, mediante el control de los parámetros del proceso de espumación, se puede obtener una estructura celular fina, una distribución uniforme de tamaño de celdas y una mejor distribución y orientación de las cargas [9].

En el caso concreto que vamos a tratar, el del PP+GF, debido a las propiedades de la propia mezcla, durante el proceso de inyección, el nivel de saturación, la nucleación de celdas y el crecimiento durante el proceso de formación de espuma, provocan una

variación de la morfología de la espuma en las diferentes partes del molde. Su reducción de peso aumenta en proporción lineal al contenido en peso de N_2 . Además de esto, la velocidad de inyección también tiene un efecto sobre la tensión de cizallamiento, lo que afecta directamente sobre el crecimiento de las celdas, su distribución y la orientación de las fibras [9].

3.2.6. Ventajas e inconvenientes de la microespumación con MuCell®

El proceso MuCell® permite la reducción del tiempo de ciclo de inyección de piezas plásticas. Esto se produce, por el efecto de la expansión celular en el interior de la cavidad, se suprime o disminuye considerablemente el tiempo de la etapa de mantenimiento y el tiempo de enfriamiento (hasta en un 50%) (Figura 3.10) [10].

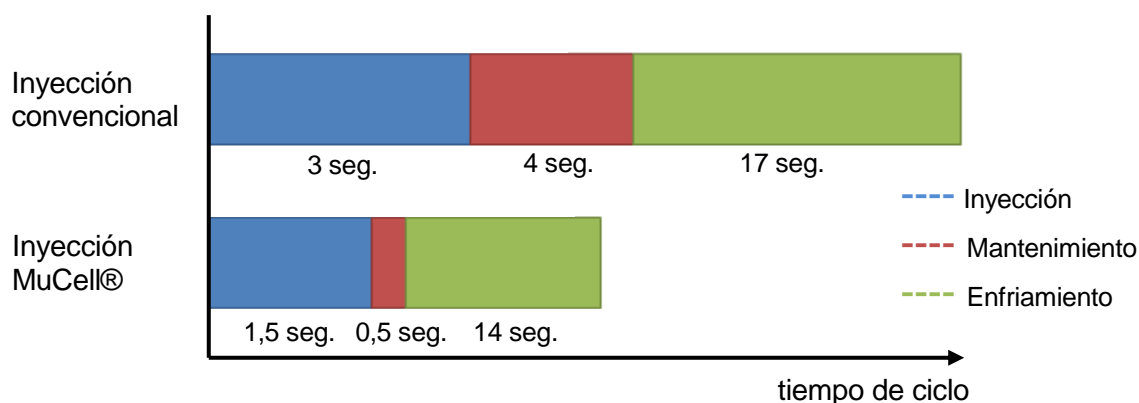


Figura 3.10. Gráfico comparativo entre tiempo de ciclo de inyección de piezas plásticas en inyección convencional frente a inyección MuCell® (modificado de [18] y [19])

La reducción en el tiempo de ciclo tiene asociada una reducción de costes, la cual puede llegar a ser de hasta un 40%. Esta tecnología presenta mejoras en cuanto a reducción de costes debido también a otros aspectos. Entre otros, la reducción de consumo de energía (no es necesaria una presión de inyección pico y se reduce en un 50% la fuerza de cierre del molde) y la de consumo de material [18].

Además de esto, esta tecnología facilita el llenado de moldes complejos por restricciones de flujo, ya que el gas disminuye la viscosidad de forma notable. Esto permite que se pueda emplear en moldes con paredes delgadas y con zonas de difícil accesibilidad, disminuyendo la presión de cierre y la de inyección [10].

Y debido a la reducción/eliminación de las etapas de empaquetamiento y mantenimiento, pueden reducirse los problemas de estabilidad dimensional, marcas de flujo y tensiones residuales después del moldeo [10].

Por otro lado, el proceso de microespumación física MuCell®, también presenta algunos inconvenientes:

- El aspecto final de las piezas se ve penalizado ya que en la superficie se pueden apreciar ráfagas y marcas de las celdas.
- Para moldes multicavidad es necesario un sistema de bebederos cuidadosamente equilibrados.
- La tecnología de proceso es más complicada que la de un sistema de inyección convencional.

3.3. Plásticos en el sector de la automoción

3.3.1. Estado del arte

En la actualidad, el plástico representa entre un 12 y un 15% del peso de los vehículos (Figura 3.11). Y se prevé que esta cantidad no deje de crecer, puesto que las exigencias en cuanto a emisiones emitidas por los automóviles están directamente relacionadas con el peso de los mismos.

En la Figura 3.12, se puede ver como se reparte según las diferentes zonas del vehículo, la cantidad total de plástico presente en éstos.

En el parque automovilístico europeo, con un promedio de vida útil de 150.000 kilómetros, gracias al empleo de plásticos el consumo de combustible se reduce en 12 millones de toneladas al año y las emisiones de CO₂ en 30 millones [20].

Además de la mejora en cuanto a la reducción de peso, los plásticos en el sector de la automoción, también aportan ventajas en cuanto a seguridad, tanto activa como pasiva.

El PP es uno de los plásticos más empleados debido tanto a sus diversas posibilidades de aplicación como a sus bajos costes de manufactura (ver Figura 3.13). Anteriormente el PP era mayoritariamente empleado para aplicaciones con bajos requerimientos técnicos. Pero de un tiempo a esta parte, sus aplicaciones han aumentado significativamente gracias a diversos factores. Entre otros, al uso de aditivos como el talco o la fibra de vidrio [21].

Respecto a las espumas poliméricas en la industria del automóvil, gracias a la gran variedad de piezas que pueden producirse con esta tecnología sin comprometer su funcionalidad, han ganado un mercado considerable. Los diseños en estos materiales, se

han promovido por diversos factores claves que son de gran interés, tanto para la empresa fabricante como para los consumidores.

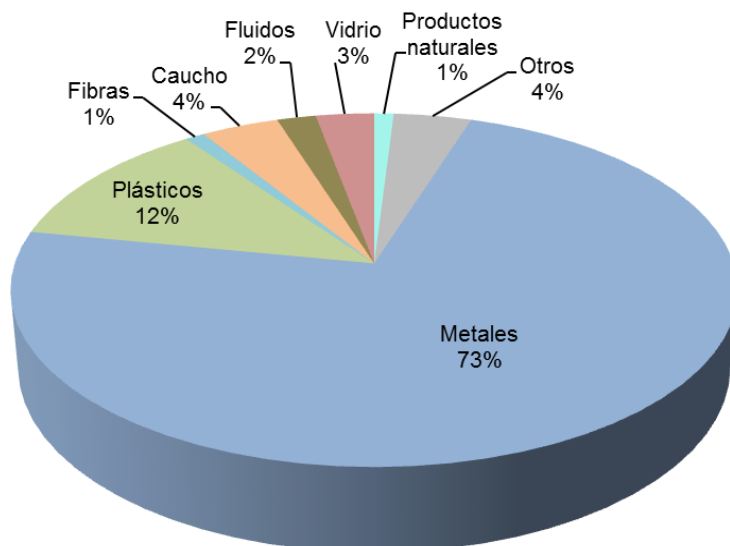


Figura 3.11. Distribución de materiales presentes en el automóvil (% en peso) (Modificado de [22])

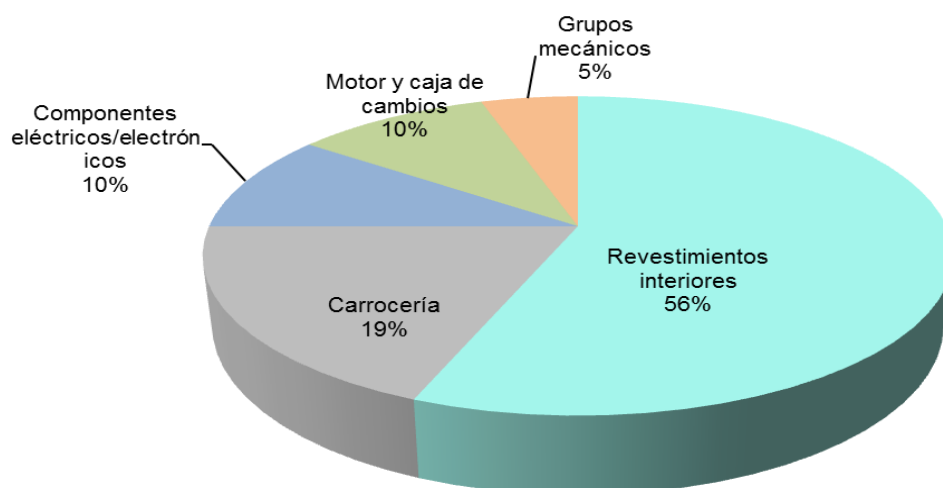


Figura 3.12. Cantidades de plástico empleado en las diferentes zonas del automóvil (% en peso) (Modificado de [22])

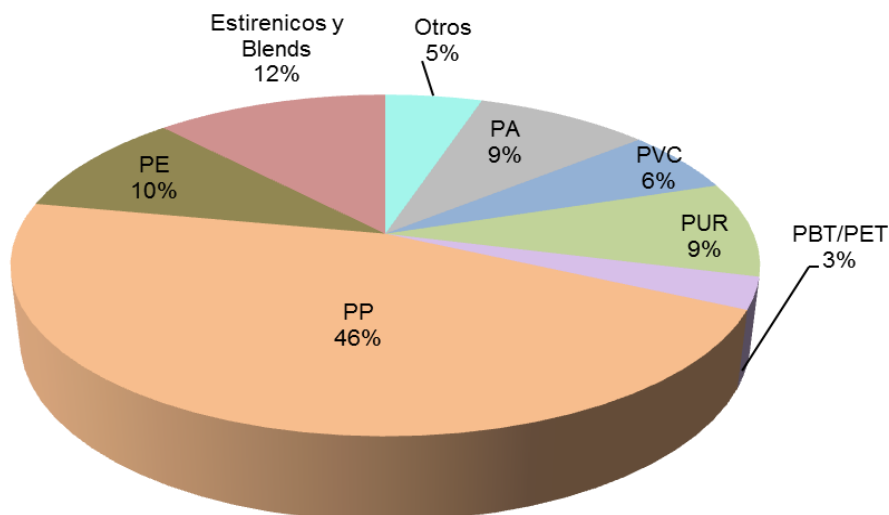


Figura 3.13. Tipos de plásticos empleados en el automóvil (% en peso) (Modificado de [22])

3.3.2. Posibilidades de reducción de peso en vehículos

La clave para reducir el peso en los vehículos, pasa por el desarrollo de nuevos materiales que nos permitan mantener la funcionalidad de las piezas, disminuyendo el peso de las mismas.

La carrocería de un coche supone gran parte del peso total del vehículo, por ello ofrece un alto potencial para la construcción ligera. En este sentido, el objetivo de los fabricantes se centra en reducir el peso del cuerpo del vehículo, manteniendo las prestaciones en cuanto a la seguridad, el rendimiento y el coste.

Por este motivo, la industria europea del automóvil está intensificando el uso de aluminio y sus aleaciones y otros materiales metálicos ligeros (acero al boro de alta resistencia, etc.) en la estructura y el chasis de los vehículos, habiéndose casi duplicado su porcentaje entre los años 2000 y 2010 y esperándose que en 2020 puedan llegar a representar el 70% de los mismos.

Otra de las vías de trabajo de los constructores de automóviles, consiste en la reducción del peso del resto de materiales que componen un vehículo, por ejemplo los materiales poliméricos.

Algunos fabricantes están trabajando en la reducción del tiempo de ciclo de la fibra de carbono. Material con el cual es posible crear componentes específicos con propiedades de resistencia a medida, creándolos tan rígidos o flexibles como sea necesario para una determinada aplicación.

Además de esto, diversos constructores ya están empleando en componentes de sus automóviles, piezas inyectadas mediante la tecnología MuCell®, tecnología objeto de nuestro estudio. Esta tecnología permite la reducción del peso de algunas piezas plásticas, manteniendo sus características. Permite la inyección de piezas disminuyendo su peso en menor o mayor medida, llegando a un compromiso entre la mencionada pérdida de peso y las propiedades mecánicas, funcionales y el ciclo de vida de las mismas.

El Grupo VW por ejemplo, ya ha introducido esta tecnología en la estructura del panel de instrumentos del modelo Golf VII. Gracias a la cual, ha conseguido aligerar el peso de la misma en 500g (Figura 3.14) [23].



Figura 3.14. Panel de instrumentos Golf VII

3.3.3. Ventajas de la reducción de peso en vehículos

Se estima que por cada 10% de reducción de peso de los vehículos, el uso de combustible mejora en un 6-7%. Además de lo que significa esto en cuanto a ahorro energético y lo que implica debido a la insuficiencia de petróleo a nivel mundial, los empresarios del sector también centran su interés en este punto por la relevancia medio ambiental que esto supone. Por cada 100 kg de peso aligerados en el vehículo, se reducen 10 gramos de CO₂ por kilómetro emitidos a la atmósfera [24].

Por otra parte, una reducción de la masa que no está en suspensión en un automóvil, amortigua significativamente el ruido, la vibración y suaviza la conducción del vehículo.

4. Materiales y procesado

4.1. Descriptiva de material

4.1.1. Policarbonato/Acrilonitrilo butadieno estireno

En este caso, la referencia comercial que hemos empleado es la Bayblend® T65xf, suministrada por la firma Covestro AG y especialmente indicado para el moldeo por inyección [25]. En la Tabla 4.1, se pueden observar las principales características del material de Covestro AG.

Tabla 4.1. Propiedades principales del material Bayblend® T65xf [25], [26] y [27]

Propiedad	Valor
Densidad (según ISO 1183)	1,13 g/cm ³
Módulo de Young (según ISO 527)	2400 MPa
Alargamiento de rotura en tracción (según ISO 527)	>50%
Fuerza de rotura (según ISO 527)	47 MPa
Módulo de flexión (ASTM D790)	2400 MPa

4.1.2. Polipropileno cargado con fibra de vidrio

La referencia comercial empleada en este caso es la SABIC STAMAX Resin 30YM240, un compuesto de PP, cargado con un 30% en peso de fibra de vidrio larga y comercializado por la firma SABIC.

La fibra de vidrio se encuentra acoplada químicamente a la matriz de PP, proporcionándole al compuesto, una alta rigidez y resistencia. En la Tabla 4.2, se pueden observar las principales características del material de SABIC.

Tabla 4.2. Propiedades principales del material SABIC STAMAX Resin 30YM240 [28]

Propiedad	Valor
Densidad (según ISO1183)	1,12 g/cm ³
Módulo de Young (según ISO 527)	6700 MPa
Alargamiento de rotura en tracción (según ISO 527)	2,3%
Fuerza de rotura (según ISO 527)	110 MPa
Módulo de flexión (ASTM D790)	5790 MPa
Resistencia al impacto Charpy (según ISO 179)	Sin entalla: 52 kJ/m ² Con entalla: 19 kJ/m ²

4.1.3. Agente espumante – Nitrógeno

Como ya se ha comentado en el punto 3.2.1, el agente espumante utilizado en nuestro caso es el N₂ en estado supercrítico. En la tabla 4.3, se describen las propiedades principales de este gas.

Tabla 4.3. Propiedades principales del N₂ como agente espumante físico [11]

Propiedad	Valor
Peso Molecular	28
Densidad	0,00116 g/cm ³
Conductividad térmica	0,0261/27 W/mK/°C
Temperatura crítica	-147 °C
Presión crítica	3,4 MPa

4.2. Inyección de placas

4.2.1. Proceso de inyección

El proceso de inyección se realizó en Covestro AG, mediante una inyectora ARBURG 570 C Allrounder 2000 – G75, equipada con un sistema de suministro de fluido supercrítico MuCell®. En la Figura 4.1, se puede ver una inyectora equipada con el sistema de

suministro de fluido supercrítico MuCell®, de características comparables a la inyectora en la que se produjeron las placas, del fabricante ENGEL.



Figura 4.1. Inyectora ENGEL Victory 110. Equipada con el sistema de suministro de fluido supercrítico MuCell®. Equipamiento disponible en el *Centre Català del Plàstic* (CCP).

Para la realización de los estudios morfológicos y mecánicos se inyectaron placas rectangulares de 400 mm de longitud por 130 mm de anchura (Figura 4.2). El molde en el que se llevó a cabo la inyección contaba con una sola cavidad, la entrada del molde es una entrada cónica con cámara caliente. Se inyectaron placas con el espesor nominal de la cavidad (3 mm) y aumentándola mediante tecnología Core Back (hasta 3,7 mm de espesor).

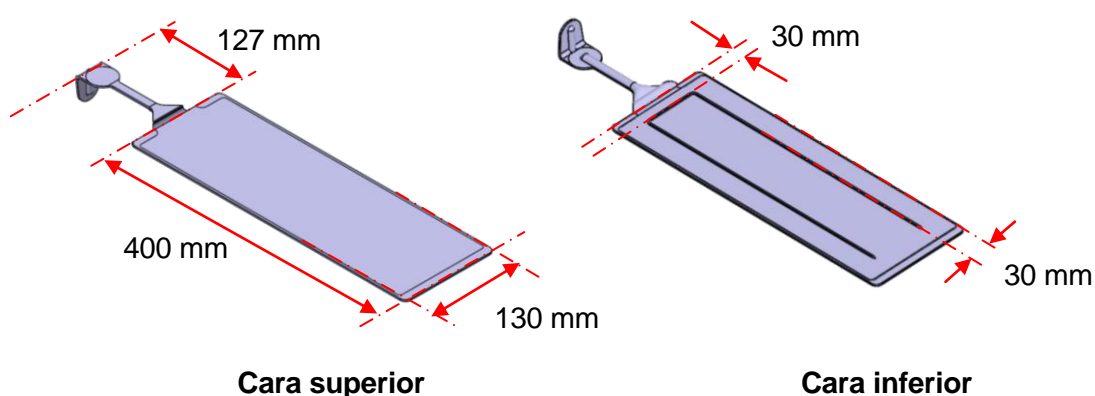


Figura 4.2. Esquema de las placas inyectadas (cara superior e inferior)

Con el objetivo de poder realizar la comparativa de cada uno de los materiales objeto de estudio de este proyecto, se inyectaron placas macizas y espumadas, con los espesores y la reducción de peso (placas espumadas) que se detallan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Espesores de las placas inyectadas

Material	Espesor [mm]	
	PC/ABS	PP-GF30
Placas macizas	3	3
Placas espumadas con 10% de reducción de peso	3	3
	3,3	3,3
	-	3,7

4.2.2. Parámetros de inyección

Como hemos visto en el apartado teórico, las condiciones de inyección son muy importantes en el proceso de microespumación ya que afectan a la estructura celular. Estas condiciones, en nuestro caso, se han mantenido constantes para todos los niveles de espumación. En la Tabla 4.5, se describen los parámetros de inyección seguidos en este estudio.

Tabla 4.5. Parámetros de inyección empleados en los dos materiales. Se indican para cada material los parámetros del material macizo y los del espumado

	PC/ABS		PP-GF30	
	Macizo	Espumado	Macizo	Espumado
Contenido en peso de gas [%]	0	0,5	0	0,5
Temperatura de dosificación [°C]	280	280	240	240
Velocidad de inyección [mm/s]	100	100	100	100
Temperatura del molde [°C]	80	80	30	30
Presión de operación del SCF [MPa]	-	23	-	11
Contrapresión [MPa]	19	19	8	8
Volumen dosificación [mm]	96	77	100	79,2
Presión de inyección [MPa]	202,5	177	95	87/82,9
Tiempo de ciclo [s]	0,86	0,81	0,91	0,83

5. Métodos experimentales

5.1. Acondicionamiento de probetas

Para llevar a cabo la caracterización morfológica y mecánica expuesta en los objetivos del proyecto, se cortaron y se mecanizaron, a partir de las placas inyectadas, las probetas necesarias para cada uno de los ensayos.

Las probetas se han extraído de las placas con las diferentes condiciones de inyección (placas macizas y espumadas), a distintas distancias del punto de inyección (Zona A: zona más próxima al punto de inyección; Zona B: zona central; Zona C: zona más alejada del punto de inyección) y tanto en la dirección MD como en la dirección TD (ver Figuras 5.1 y 5.2).

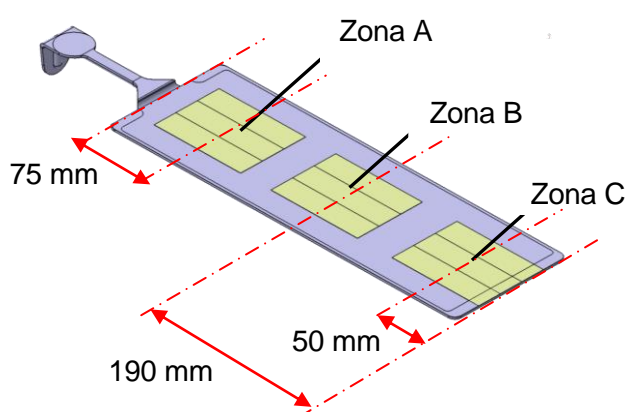


Figura 5.1. Esquema de extracción de probetas para caracterización mecánica. Zonas A, B y C en dirección MD

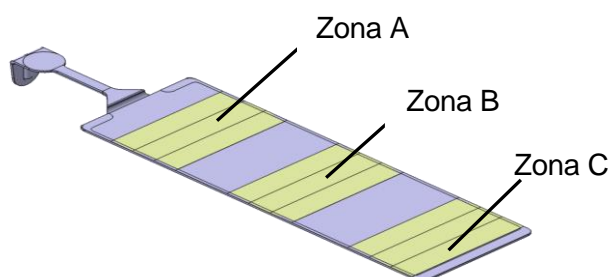


Figura 5.2. Esquema de extracción de probetas para caracterización mecánica. Zonas A, B y C en dirección TD (medidas análogas a las de la Figura 5.1)

Cabe destacar que para realizar el análisis morfológico se emplean secciones transversales de las probetas, por lo que se utilizan probetas cortadas en dirección MD para analizar la dirección TD y viceversa (ver Figura 5.3 y 5.4). Por este motivo, siempre que hablemos de direcciones en el análisis morfológico, nos referiremos a la dirección de observación y no a la dirección en la que están cortadas las probetas.

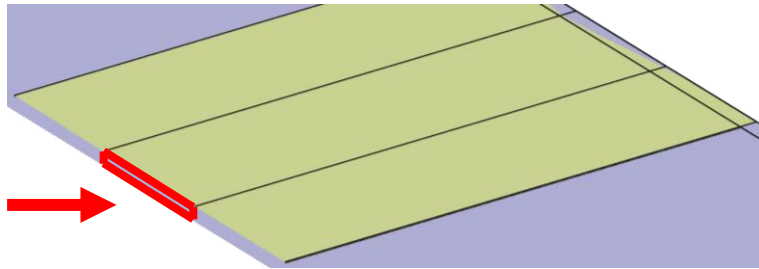


Figura 5.3. Esquema de extracción de probetas para análisis morfológico, probeta cortada en TD, dirección de observación MD

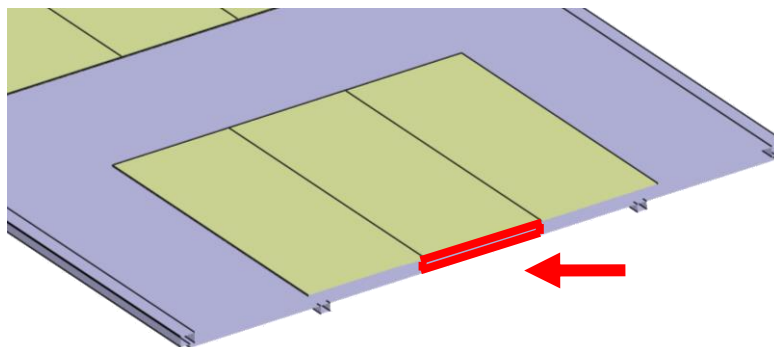


Figura 5.4. Esquema de extracción de probetas para análisis morfológico, probeta cortada en MD, dirección de observación TD

Debido a la presencia de nervios en la cara inferior de las placas (ver Figura 4.2), en el caso de la dirección MD, se mecanizaron las probetas en el área central de cada zona estudiada (área exenta de nervios). En la dirección TD, puesto que la zona de la probeta sobre la que se realiza el ensayo, es la zona central, los nervios presentes en los extremos de éstas, no se encuentran en la zona ensayada y por lo tanto, no tienen influencia sobre los resultados.

5.2. Inspección visual

5.2.1. Probetas

Antes de la extracción de las probetas se llevó a cabo una inspección visual de las placas inyectadas.

5.2.2. Ejecución del ensayo

La inspección visual consiste en una valoración cualitativa y comparativa del aspecto superficial de las diferentes placas. Por lo tanto, para la inspección visual no se requiere de ningún equipo específico.

Además de este ensayo cualitativo, los fabricantes de automóviles emplean diferentes equipos para la medición del color y del brillo de las diferentes piezas. En nuestro caso, estas mediciones no aplican, puesto que por el momento, solo se contempla el empleo de esta tecnología para piezas no vistas del vehículo. Por lo tanto, tan solo se realizó una evaluación cualitativa del aspecto que presentan las diferentes placas, y de cómo varía éste en las diferentes condiciones.

5.3. Caracterización morfológica

5.3.1. Probetas

El análisis morfológico se realizó mediante MEB. Se tomaron imágenes de las secciones transversales de las diferentes placas espumadas de los dos materiales, en las diferentes zonas de las placas y en las dos direcciones.

De cada una de las secciones de cada placa y de cada nivel de espumación, se toman dos imágenes: una de la superficie total de la probeta (aumento x25) y otra, con mayor aumento (aumento x50), de una porción de la superficie.

En este caso las probetas son secciones de 10 mm de ancho.

Aunque se examinan mediante microscopio todas las zonas de las diferentes placas, sólo se obtienen parámetros morfológicos cuantitativos de las secciones correspondientes al centro de la zona B de las placas espumadas, puesto que se corresponde con el centro de

las placas inyectadas. El análisis se realizará tanto en la dirección MD como en la dirección TD.

5.3.2. Ejecución del ensayo

Para poder analizar correctamente las diferentes secciones mediante MEB, la superficie de la sección debe ser lo más plana posible y para que el análisis sea lo más próximo a la realidad debe evitarse la deformación de la estructura celular obtenida en el proceso de inyección. Para ello, la sección objeto de análisis debe ser obtenida mediante una rotura frágil de las probetas.

En primer lugar, una vez cortadas y fresadas las probetas de cada una de las zonas, debe efectuarse en todas ellas una entalla mediante una cuchilla. Esto se hizo con el fin de tener controlada la zona sobre la que se realizó la sección a analizar y para provocar el inicio de la fractura.

Para poder realizar la fractura frágil, es necesario criogenizar las probetas sobre las que se ha realizado la entalla. En nuestro caso, este enfriamiento se hizo introduciendo las probetas en nitrógeno líquido.

A continuación, se introdujeron las muestras en la máquina de metalizado para ser recubiertas en oro y proveer al polímero de conductividad. De esta manera ya pueden realizarse las observaciones en el MEB.

Una vez tomadas las fotomicrografías deseadas en cada una de las zonas de las placas espumadas, se procedió a realizar la caracterización morfológica.

Las fotomicrografías, permitieron medir el espesor de la piel de las placas en cada zona.

Posteriormente, para que el *software* de análisis de imágenes IgorPro cuente la cantidad de celdas aisladas y calcule su área (en píxeles) con exactitud, éstas deben presentar la misma tonalidad y debe existir un buen contraste entre las celdas y la matriz polimérica. Por lo que inicialmente y para preparar las imágenes que después serían analizadas por dicho programa, se utilizó el *software* de edición de imágenes Photoshop para identificar las celdas y matizar su color hasta lograr una clara diferenciación entre ellas y la matriz. Para el área de las celdas obtenido se realizó una conversión de los píxeles acorde a la micromarca generada por el aumento del microscopio.

5.3.3. Cálculo y expresión de los resultados

5.3.3.1. Espesor/proporción de piel

A partir del espesor de piel medido en las fotomicrografías, mediante la ecuación 5.1, se calcula la proporción de espesor de piel con respecto al espesor total de la placa.

$$\% piel = \frac{E_t - E_n}{E_t} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Dónde:

%piel: proporción de espesor de piel respecto a espesor total [%]

E_t : espesor total [mm]

E_n : espesor núcleo espumado [mm]

5.3.3.2. Tamaño de celda

A partir del análisis de las imágenes tomadas mediante MEB, el *software* IgorPro, nos proporciona el área y el número de celdas. A partir de estos datos y para continuar con el análisis se asume que estas celdas son esféricas y mediante la ecuación 5.2, se calcula un diámetro equivalente.

$$\text{Diámetro} = \sqrt{\frac{A \times 4}{\pi}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Dónde:

Diámetro: diámetro equivalente [μm]

A: área de las celdas [μm]

5.3.3.3. Densidad celular

La densidad celular es un parámetro que puede proporcionar información para la predicción de las propiedades físicas de una determinada espuma polimérica. Ésta se puede calcular según la ecuación 5.3:

$$N_0 = \left(\frac{n}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right) \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Dónde:

N_0 : número de celdas por centímetro cubico [celdas/cm³]

n : número de celdas en la fotografía

A : área de la fotografía [cm²]

ρ_s : densidad del solido

ρ_f : densidad de la sección espumada

5.4. Densidad aparente

5.4.1. Probetas

Las probetas para el cálculo de la densidad aparente son las mismas probetas que las empleadas en los ensayos de flexión e impacto de las zonas A, B y C de las diferentes placas.

5.4.2. Ejecución del ensayo

Para el cálculo de la densidad aparente se analizaron un mínimo de 5 muestras por placa y zona.

Todas estas probetas, se pesaron en el CCP, en una balanza digital Mettler Toledo, modelo PB-303-DR (precisión de +/- 0,001 g) (Figura 5.5).



Figura 5.5. Balanza digital Mettler Toledo, modelo PB-303-DR

Para establecer el volumen de las probetas pesadas, se midieron las diferentes longitudes que las delimitaban mediante un pie de rey y con estas dos propiedades de las diferentes probetas, ya se pudo proceder al cálculo de la densidad aparente de cada una de ellas.

5.4.3. Cálculo y expresión de los resultados

Para la realización del cálculo, se emplea la ecuación 3.1 explicada en el apartado 3.1.2.1.

5.5. Caracterización mecánica - Ensayos de tracción

5.5.1. Probetas

Las probetas mecanizadas para llevar a cabo el ensayo de tracción, son probetas planas, normalizadas según la norma ISO 527 A, la probeta empleada es del tipo 5A (Figura 5.6).

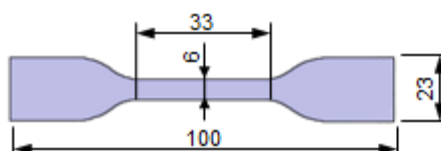


Figura 5.6. Esquema probeta de tracción tipo 5A. Dimensiones en milímetros.

5.5.2. Ejecución del ensayo

Los ensayos de tracción, se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ISO-527. Se realizaron en las instalaciones del CCP, en una máquina de tracción Zwick Roell modelo Z010 con una célula de carga de 10 kN (Figura 5.7).

Las mordazas deben fijarse a la máquina, de forma que el eje principal de la probeta coincida con la dirección del alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción. La probeta se debe sujetar de manera que se evite el desplazamiento de ésta con respecto a las mordazas, de lo contrario, los resultados de alargamiento obtenidos serían erróneos, puesto que al alargamiento del propio material le estaríamos sumando el del desplazamiento de la probeta en la mordaza. El sistema de sujeción no debe provocar roturas ni daños sobre las probetas, esto podría provocar una entalla que desencadenaría en una rotura prematura de la probeta, causada por el daño provocado y no por las características del material.



Figura 5.7. Máquina de tracción Zwick Roell modelo Z010 del CCP

El alargamiento producido en las probetas de tracción, se mide mediante el desplazamiento de las mordazas.

Los ensayos de tracción para los cálculos de la tensión de rotura y la tensión y deformación de fluencia, se realizaron a temperatura ambiente (23 °C), con una distancia entre mordazas de 72 mm y una velocidad constante de 50 mm/min. La probeta se fija con las dos mordazas y se somete a tracción en la dirección del eje principal. La probeta se alarga hasta la rotura.

Los ensayos de tracción para el cálculo del módulo de Young, empiezan con una precarga que dura unos segundos a una velocidad de 1 mm/min. En esta precarga, las probetas son sujetadas por unos extensómetros de contacto que acompañan su desplazamiento. Tras la precarga, los extensómetros se abren y el ensayo continúa a 14 mm/min.

Del ensayo se extraen los datos de carga soportada por la probeta y el alargamiento que se produce en ésta.

5.5.3. Cálculo y expresión de los resultados

5.5.3.1. Cálculo de esfuerzos

El cálculo de los esfuerzos se realiza sobre la base del área de la sección transversal inicial de la probeta. Para esto, empleamos la ecuación 5.4.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Dónde:

σ : esfuerzo de tracción [MPa]

F: fuerza [N]

A: área de la sección transversal inicial [mm²]

5.5.3.2. Cálculo de deformaciones

El cálculo de las deformaciones se realiza tomando como base la longitud de referencia de la probeta antes de ensayo. También es necesario disponer del alargamiento medido a través del desplazamiento de las mordazas. La ecuación necesaria para el cálculo es la 5.5.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Dónde:

ε : deformación [%]

L_0 : longitud de referencia de la probeta [mm]

ΔL_0 : incremento de longitud [mm]

5.5.3.3. Cálculo del módulo de Young

Para el cálculo del módulo de Young, pueden emplearse dos métodos:

Método pendiente secante

Este método permite calcular la pendiente de la zona elástica seleccionando dos valores de esfuerzos de dicha zona y dividiéndolos por sus respectivos desplazamientos (ver ecuación 5.6).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Dónde:

E: módulo de Young [MPa]

σ : esfuerzo de tracción en la zona elástica [MPa]

ε : deformación en la zona elástica [%]

Método pendiente de una recta de regresión

El segundo método puede llevarse a cabo en un equipo asistido por ordenador. Se basa en una regresión lineal, aplicada a la parte de la curva situada entre los puntos mencionados en el método anterior. Emplea la ecuación 5.7.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Dónde:

E: módulo de Young [MPa]

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$: pendiente de la recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados a la curva entre los puntos mencionados en el método pendiente secante [MPa].

5.6. Caracterización mecánica - Ensayos de flexión

5.6.1. Probetas

En el caso del ensayo de flexión, las probetas son planas y rectangulares. Tienen una longitud de 100 mm, una anchura de 10 mm y el espesor varía en función de las condiciones de inyección (Figura 5.8).

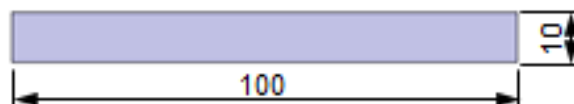


Figura 5.8. Esquema probeta de flexión. Dimensiones en milímetros.

5.6.2. Ejecución del ensayo

Los ensayos de flexión, se hicieron siguiendo las recomendaciones de la norma ISO-178. En la máquina de ensayos universal del CCP se empleó una célula de carga de 5 kN y los soportes requeridos para los ensayos de flexión (Figura 5.9).



Figura 5.9. Máquina de ensayos universal Galdabini del CCP

Los ensayos de flexión se realizaron a temperatura ambiente (23 °C), con 3 puntos de apoyo, con una distancia entre apoyos de 64 mm y con velocidad de ensayo de 10 mm/min.

Del ensayo se extraen los datos de carga soportada por la probeta y la deformación que se produce en ésta.

5.6.3. Cálculo y expresión de los resultados

5.6.3.1. Cálculo de resistencia a la flexión

Para el cálculo de la resistencia a la flexión, se emplea la ecuación 5.8.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Dónde:

σ_f : resistencia a la flexión [MPa]

F: fuerza aplicada [N]

L: distancia entre apoyos [mm]

b: anchura de la probeta [mm]

h: espesor de la probeta [mm]

5.6.3.2. Cálculo del módulo de flexión

El cálculo del módulo de flexión, se realiza de manera análoga al del módulo de tracción (Ecuación 5.6 ó 5.7).

5.7. Caracterización mecánica - Ensayos de impacto

5.7.1. Probetas

Para el ensayo de impacto Charpy se han empleado dos tipos de probetas.

En el caso del material PP-GF30, las probetas que se han utilizado, son probetas de las mismas características que las empleadas para el ensayo de flexión (probetas planas rectangulares con 100 mm de longitud por 10 mm de anchura).

Sin embargo, en el caso del PC/ABS, se ha empleado la misma probeta que hemos descrito para el PP-GF30, pero con una entalla en uno de sus lados (ver detalle en la Figura 5.10).

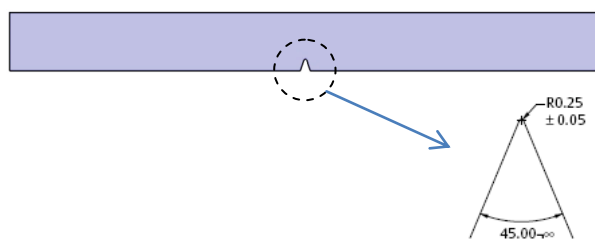


Figura 5.10. Esquema de probeta para ensayo de impacto Charpy para el material PC/ABS

En este último caso, ha tenido que realizarse la entalla, puesto que sin ella, el material no rompía.

5.7.2. Ejecución del ensayo

Los ensayos de impacto Charpy nos dan información sobre la energía de choque absorbida por la ruptura de la probeta.

Los ensayos se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ISO-179, mediante la máquina de impacto Ceast disponible en las instalaciones del CCP, con un péndulo de 25 J del modelo M980 (Figura 5.11), a temperatura ambiente.



Figura 5.11. Máquina de impacto Ceast del CCP con péndulo de modelo M980 de 25 J para los ensayos de impacto.

El ensayo consiste en golpear mediante una sola oscilación del percutor a una velocidad elevada y constante, una probeta colocada horizontalmente entre sus apoyos.

Los parámetros de ensayo fueron: 99° de ángulo de impacto, 2,91 m/s de velocidad de ensayo, 62 mm de distancia entre apoyos, 0,374 m de longitud del percutor y una masa reducida de 3,654 kg.

En las probetas sin entalla, ésta se coloca sobre la cara del espesor (ver Figura 5.12), por lo que el percutor golpea sobre la cara del ancho y no sobre la cara del espesor, como en el caso de las probetas con entalla.

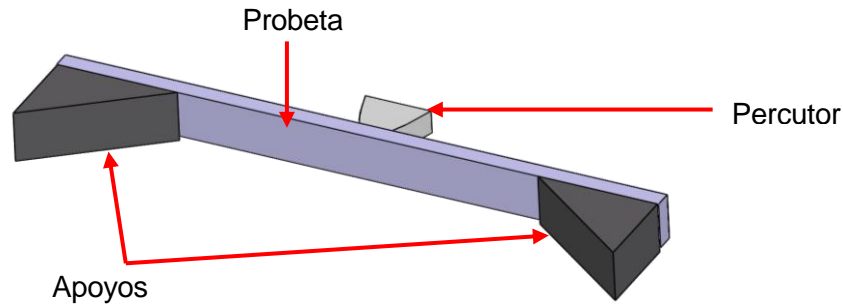


Figura 5.12. Posicionamiento de la probeta sin entalla (material PP-GF30) para el ensayo de impacto Charpy

Las probetas con entallas de 2 mm de profundidad, se posicionan horizontalmente para realizar el impacto sobre el canto de las mismas. Por este motivo, tal y como sucedía en el análisis morfológico, se emplean probetas cortadas en dirección MD para analizar la dirección TD y viceversa, por lo que en el análisis de impacto del material PC/ABS, hablaremos siempre de dirección de propagación de grieta y no de dirección de corte de la probeta. Cuando se realiza el ensayo de impacto sobre probetas con entalla, la línea de impacto, se encuentra en la cara opuesta a la entalla simple (Figura 5.13).

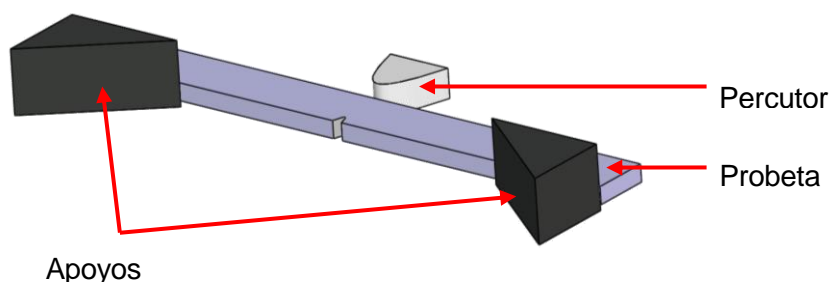


Figura 5.13. Posicionamiento de la probeta con entalla (material PC/ABS) para el ensayo de impacto Charpy

5.7.2.1. Cálculo y expresión de los resultados

El ensayo de impacto Charpy mide la energía que necesita el percutor o péndulo, para romper la probeta, entallada o no, del material ensayado.

El cálculo de la energía se hace en base a un punto inicial h_0 y un punto final h_1 , de manera que la energía absorbida por la probeta ensayada (E_c), es igual a la diferencia entre la energía potencial del péndulo en el punto inicial (E_{c0}) y la energía potencial del péndulo en el punto final (E_{c1}) (ver Figura 5.14 y ecuación 5.9).

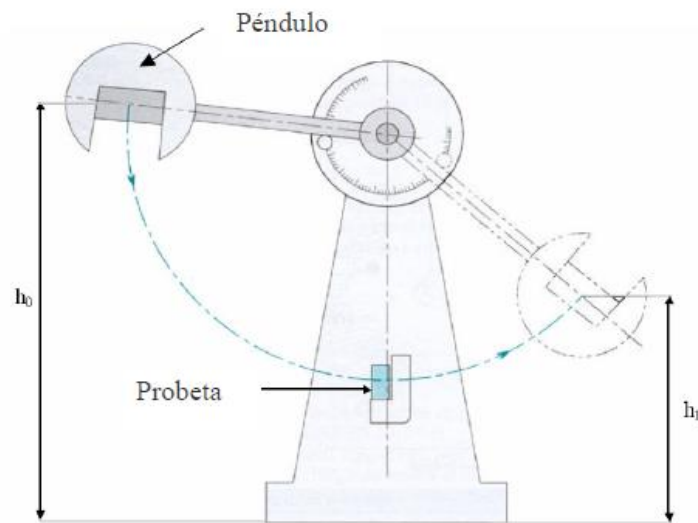


Figura 5.14. Esquema de ensayo de impacto Charpy

$$a_c = \frac{E_c}{hb} \times 10^3 \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Dónde:

a_c : resistencia al impacto Charpy (resiliencia) [kJ/m²]

a_{cU} → probetas sin entalla (PP-GF30)

a_{cN} → probetas con entalla (PC/ABS)

E_c : energía absorbida por la probeta [J]

h : espesor de la probeta [mm]

b : anchura de la probeta sin entalla o anchura de la probeta que queda en la base de la entalla (si la probeta es con entalla) [mm]

b → probetas sin entalla (PP-GF30)

b_N → probetas con entalla (PC/ABS)

6. Resultados y discusión material PC/ABS (Bayblend® T65xf)

6.1. Inspección visual

En la Figura 6.1, puede observarse el aspecto visual de las diferentes placas inyectadas del material PC/ABS.



Figura 6.1. Imagen placas inyectadas del material PC/ABS: 1) Macizo; 2) espumado 10%, 3 mm de espesor; 3) espumado 10%, 3,3 mm de espesor

Como puede apreciarse en las fotografías tomadas de las diferentes placas con las distintas condiciones de inyección, el proceso de espumación tiene una gran influencia sobre el aspecto final de las placas. Las piezas presentan un color más claro que cuando el material es inyectado sin agente espumante (placa 1). Además en las placas espumadas pueden apreciarse flujos del material (ver Figuras 6.2 y 6.3), cosa no deseable en caso de que se quisiese emplear este material en piezas vistas. Ni el aspecto ni el acabado, son uniformes ni homogéneos.



Figura 6.2. Detalle de la placa inyectada de PC/ABS espumado 10%; 3 mm de espesor



Figura 6.3. Detalle de la placa inyectada de PC/ABS espumado 10%; 3,3 mm de espesor

Esta modificación en cuanto al aspecto visual de las placas se atribuye principalmente al escape de gas de la solución polímero/gas hacia el frente de material fundido y/o hacia el

exterior de la mezcla fundida. Se produce la nucleación de estas celdas en la superficie, quedando éstas atrapadas entre la masa fundida y la cavidad del molde [29].

Cuando se inyecta la solución polímero/gas en la cavidad en una sola fase a través de la boquilla, la fuerte caída de presión y la variación de temperatura provocan que el nitrógeno emerja de la solución y que empiecen a tener lugar la nucleación y el crecimiento celular. En el frente del flujo de inyección, donde la presión es menor a la atmosférica (en el caso de cavidades con una correcta ventilación) y debido a la trayectoria que tiene hacia el exterior, en el núcleo caliente de material puede formarse y emerger hacia la superficie un número de celdas relativamente elevado.

El estiramiento y el colapso de las celdas, así como el escape y atrapamiento del gas en la interfaz entre el material fundido y la cavidad del molde, contribuyen a las marcas y rayas de plata en la superficie de la pieza [29].

6.2. Caracterización morfológica

El análisis morfológico de los materiales espumados, a través de MEB, permite analizar la estructura interna de las espumas y su relevancia en las características y propiedades finales de las piezas. Es importante relacionar la influencia de los parámetros de inyección y de conformado en la formación de la microestructura para poder predecir el comportamiento que se obtendrá en las piezas.

En las imágenes obtenidas puede observarse una estructura tipo sándwich piel/núcleo/piel. Como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo 3, la piel se genera debido a que la temperatura del molde, es considerablemente menor a la temperatura del polímero fundido. Esto genera un choque térmico entre la masa fundida (polímero con agente espumante disuelto) y la superficie metálica del molde, causando un enfriamiento brusco del material fundido y la disminución de la fluidez del mismo. El enfriamiento del polímero, genera en éste, rigidez localizada, lo que actúa como oposición a la nucleación por la disminución de la difusión de las moléculas de gas espumante y evita el crecimiento de las celdas por imposibilidad de expansión dentro del polímero solidificado. De esta manera puede justificarse de manera generalizada, que en la piel no exista estructura celular.

Como ya se ha comentado en el capítulo 5, para el análisis de la estructura celular de las probetas, se han tomado dos imágenes de cada una de las zonas de cada placa: zona más próxima al punto de inyección (Zona A), zona central (Zona B) y zona más alejada del punto de inyección (Zona C), en las dos direcciones y de cada nivel de espumación. Estas imágenes serán una de la superficie total de la probeta con un aumento de x25 (ver

resumen en Tabla 6.1) y otra más ampliada con un aumento de x50 (ver resumen en Tabla 6.2).

Por lo que se puede observar en las imágenes, el espesor de piel aumenta en la dirección MD, sobre todo en la zona más alejada del punto de inyección (zona C).

Como ya se ha observado en estudios anteriores [30] y [31], se puede apreciar que debido al arrastre del flujo durante el llenado, en dirección del flujo de inyección, las celdas en las zonas más próximas a la piel, pierden esfericidad y se transforman en celdas alargadas. En el centro, en su mayoría siguen manteniéndose esféricas.

Si se compara la espumación sin y con Core Back, se puede apreciar que la que se inyectó con Core Back, presenta un mayor número de celdas de menor tamaño.

Las celdas de tamaños mayores se observan en la parte más interna del núcleo. Las elevadas temperaturas conjuntamente con la menor ratio de refrigeración en la sección central, provocan una menor viscosidad del polímero fundido, una mayor expansión celular y mayor coalescencia entre celdas [32]. Mientras que las bajas temperaturas en las paredes del molde facilitan la formación de la piel, inhibiendo la formación de celdas.

En general se observa una estructura celular homogénea y uniforme. Esto es debido a la propia naturaleza del material ya que en diversos estudios, se ha concluido que la fase elastomérica del Butadieno en el ABS, actúa como núcleo de espumación, mejorando la nucleación celular.

De las imágenes obtenidas se procede a realizar los siguientes análisis sobre la zona B de cada una de las placas espumadas (en la dirección MD y en la TD), ya que es la zona central de la placa.

Tabla 6.1. Microscopía Electrónica de Barrido del PC/ABS, en las dos direcciones, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las distintas zonas de las placas (aumento x25)

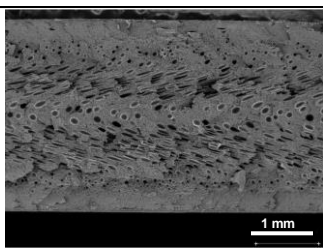
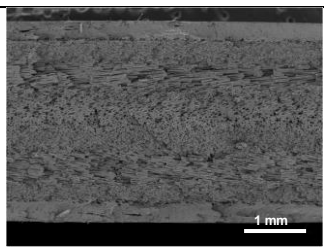
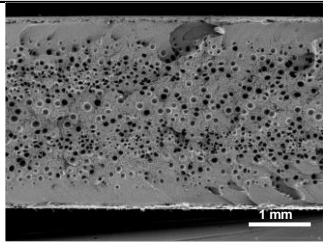
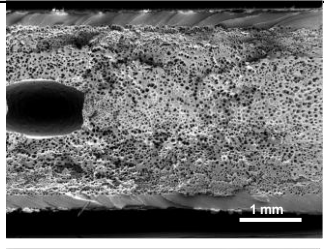
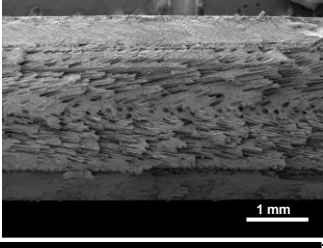
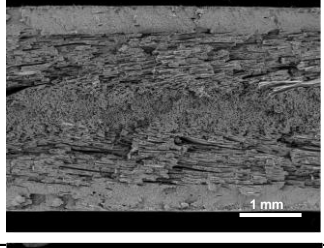
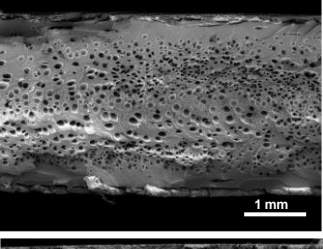
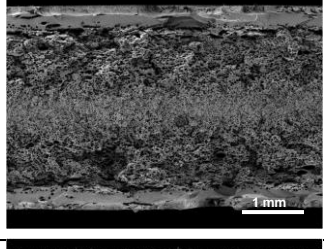
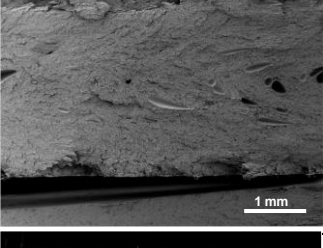
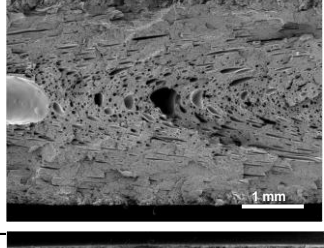
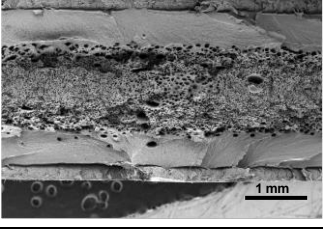
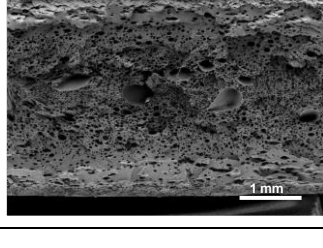
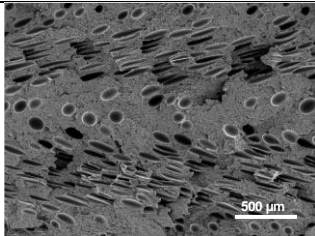
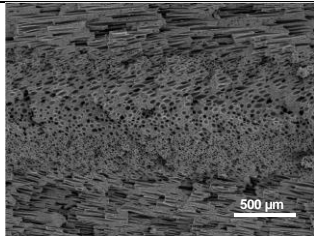
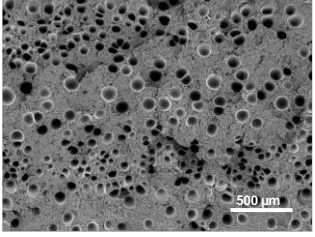
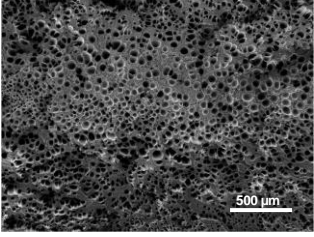
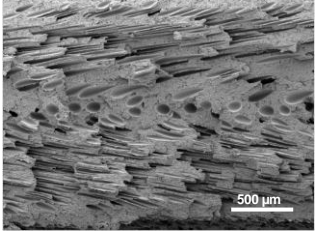
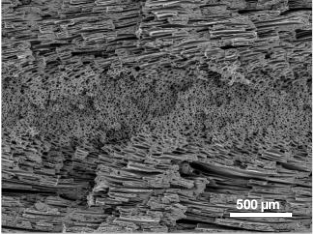
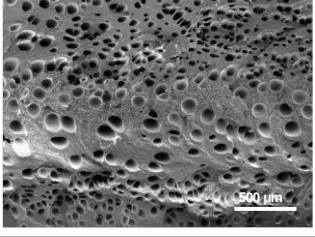
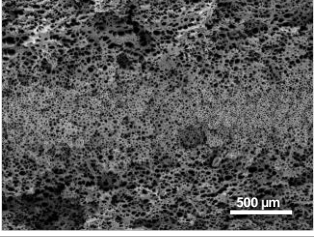
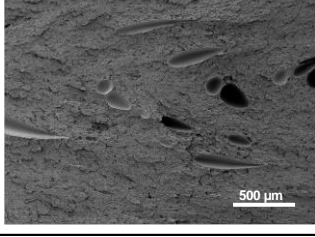
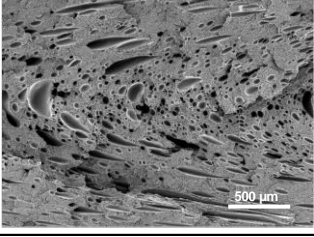
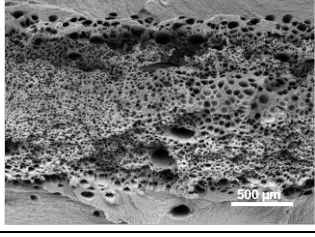
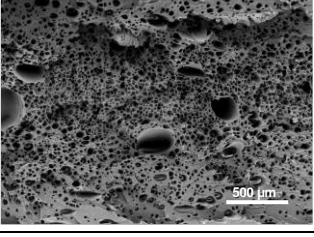
Zona	Dirección de observación	Espumado 10% 3 mm	Espumado 10% Core Back 3,3 mm
A	MD		
	TD		
B	MD		
	TD		
C	MD		
	TD		

Tabla 6.2. Microscopía Electrónica de Barrido del PC/ABS, en las dos direcciones, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las distintas zonas de las placas (aumento x50)

Zona	Dirección de observación	Espumado 10% 3 mm	Espumado 10% Core Back 3,3 mm
A	MD		
	TD		
B	MD		
	TD		
C	MD		
	TD		

6.2.1. Espesor de piel

A partir de estas imágenes, es posible diferenciar y medir el espesor de la piel y del núcleo espumado (ver Figura 6.4).

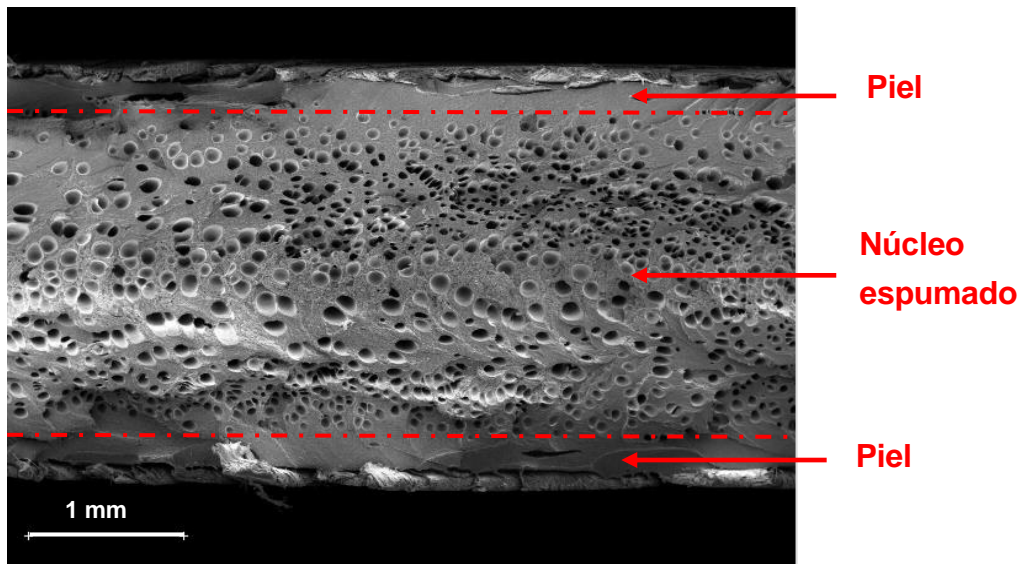


Figura 6.4. Imagen MEB de la zona B de la placa espumada con 10% de reducción de peso y 3 mm de espesor (x25)

Realizando esto con las distintas imágenes analizadas y aplicando además la ecuación 5.1 del capítulo 5, obtenemos la proporción de espesor de piel respecto al espesor total.

En la Tabla 6.3 se muestran los valores de espesor de piel hallados y la proporción de piel respecto al espesor total.

Tabla 6.3. Resumen análisis espesor y proporción de piel del PC/ABS en las dos condiciones de inyección espumadas

Condición de inyección	Espesor piel [mm]	Espesor núcleo [mm]	Proporción piel [%]
Espumado 10% 3 mm	0,39	2,12	26,9
Espumado 10% Core Back 3,3 mm	0,33	2,61	20,2

Como se puede observar, en las dos condiciones el espesor de piel es del mismo orden, alrededor de 0,4 mm. Aunque se observa una ligera disminución de espesor de piel al aumentar el espesor de la placa. Como ya se había comentado anteriormente, la formación

de la piel es debida al contraste de temperaturas entre el polímero fundido y las paredes del molde. Cuando se realiza la espumación sobre placas de menor espesor, el gradiente de temperatura en el espesor del molde avanza más rápidamente, se produce una disminución de fluidez del polímero y éste permanece fundido menos tiempo. Esto se opone a la difusión del gas en el polímero y a su nucleación y favorece la formación de una piel de mayor espesor.

La proporción de piel respecto al total es alrededor de un 6% mayor en la placa de 3 mm que en la de 3,3 mm. Esto es debido al aumento del espesor total de la placa y al ligero decremento de espesor de piel en la placa de 3,3 mm.

6.2.2. Estudio de celdas

Partiendo de las imágenes de las superficies obtenidas mediante microscopía electrónica, empleamos las imágenes de mayor aumento (x50) para con la ayuda del programa *Photoshop*, ajustar el umbral de color de cada imagen y poder aislar así las celdas del fondo (ver ejemplo en la Figura 6.5).

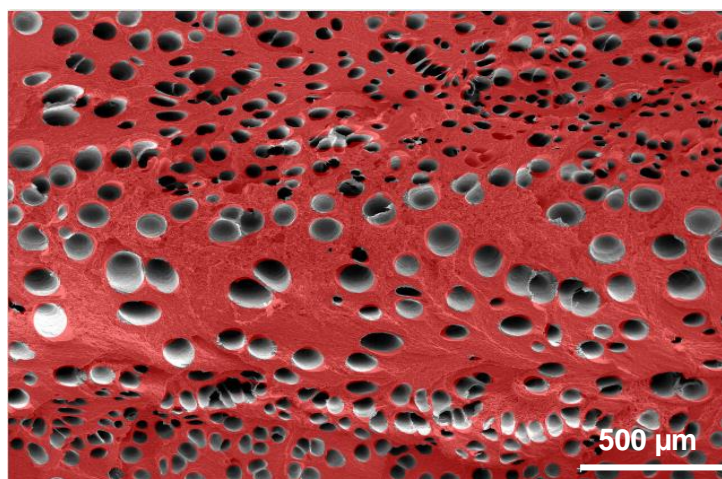


Figura 6.5. Imagen MEB del material PC/ABS (tras tratamiento de Photoshop) de la zona B de la placa espumada con un 10% de reducción de peso y 3 mm de espesor en la dirección TD (x50)

Una vez que las tenemos aisladas, se realiza mediante el *software* IgorPro, el análisis de los tamaños de celdas y la densidad celular (siguiendo la ecuación 5.2 y 5.3 del capítulo 5). Ver resultados en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Resumen análisis de celdas del PC/ABS en las dos condiciones de inyección espumadas

Condición de inyección	Dirección	Diámetro mínimo [μm]	Diámetro máximo [μm]	N_0 [celdas/ cm^3]
Espumado 10% 3 mm	MD	6	332	$1,4 \times 10^6$
	TD	9	166	$1,0 \times 10^6$
Espumado 10% Core Back 3,3 mm	MD	3	281	$2,9 \times 10^7$
	TD	3	120	$3,7 \times 10^7$

De estos resultados se deriva que las placas de la espumación con Core Back de 3,3 mm de espesor, presentan del orden de entre 22 y 37 veces mayor cantidad de celdas que las placas espumadas con 3 mm de espesor. Siendo los tamaños de las celdas del mismo orden de magnitud. Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, en las placas con mayor espesor, el polímero se mantiene fundido durante un periodo de tiempo más elevado, esto provoca que exista mayor tiempo de difusión del gas en el polímero y de nucleación de las celdas. Por este motivo, se produce un aumento de densidad celular al aumentar el espesor de las placas espumadas.

Por lo que respecta a los tamaños de celda, en la Figura 6.6 se puede observar la frecuencia con la que encontramos cada uno de los tamaños de celda en las diferentes condiciones de espumación y en las distintas direcciones.

Como se puede observar en la gráfica, los tamaños de celda que prevalecen son los que tienen un diámetro de entre 0 y 20 μm .

Respecto a las diferencias entre los distintos espumados, se observa que en los espumados de 3 mm de espesor las celdas son de tamaño más homogéneo y más grandes que las de las placas espumadas de 3,3 mm de espesor. Esto puede ser debido al mayor número de celdas presentes en las placas con mayor espesor, y a que esta cantidad elevada de celdas consuma el gas disuelto disponible en el polímero [10].

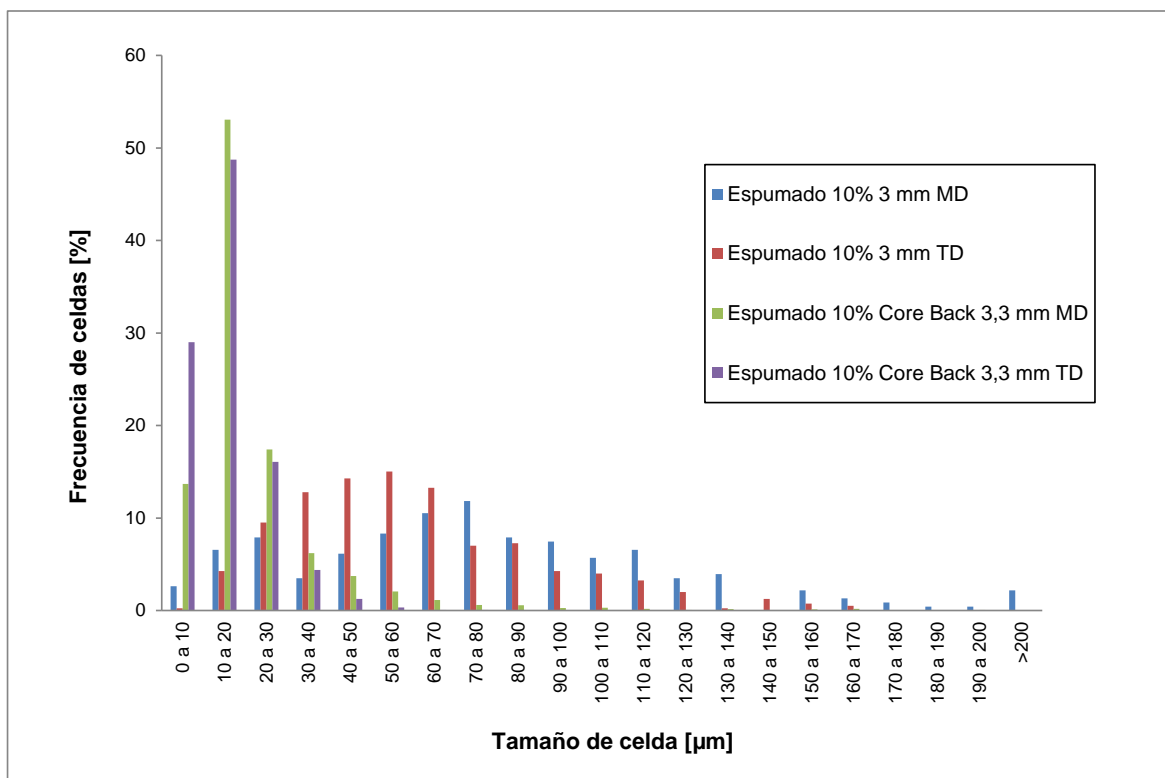


Figura 6.6. Histograma de frecuencias de tamaño de celda del material PC/ABS, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las dos direcciones

6.3. Densidad aparente

La densidad aparente es una característica fundamental en el estudio de los materiales espumados. La relación polímero-gas, además de establecer la reducción de peso a consecuencia de la espumación, también se encuentra directamente relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de las espumas.

En nuestro estudio, se ha buscado en todos los casos, una reducción de peso del 10%, en placas de 3 mm de espesor y en placas con apertura de cavidad de molde (Core Back) de 3,3 mm de espesor. Ambas espumaciones con la misma cantidad de agente espumante añadido.

En la Tabla 6.5 puede verse un resumen de las densidades halladas en las diferentes placas (material macizo y material espumado), en las distintas zonas con respecto al punto de inyección (Zona A: zona más próxima al punto de inyección; Zona B: zona central de las placas; Zona C: zona más alejada del punto de inyección). En ella se muestran los valores

absolutos y en el caso de las placas espumadas, la diferencia en tanto por ciento, con respecto al material macizo (Δ_{m-e}).

Tabla 6.5. Resultados de densidad aparente del material PC/ABS en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

Densidad (ρ)					
	Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm	
		Valor absoluto [g/cm^3]	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto [g/cm^3]	Δ_{m-e} [%]
A	$1,13 \pm 0,03$	$1,04 \pm 0,02$	↓ 8,6%	$0,94 \pm 0,01$	↓ 16,8%
B	$1,14 \pm 0,03$	$1,04 \pm 0,02$	↓ 8,5%	$0,94 \pm 0,02$	↓ 17,2%
C	$1,11 \pm 0,02$	$1,04 \pm 0,01$	↓ 5,6%	$0,94 \pm 0,02$	↓ 15,5%

En general vemos que en las placas en las que solo se ha disminuido el peso, sin aumentar el espesor (placas con 10% de reducción de peso), en la densidad, no llegamos a apreciar esta disminución del 10% en ninguna de las tres zonas. Esto se debe a que aunque realmente el peso haya disminuido un 10%, de manera no provocada, también ha disminuido ligeramente el espesor de las placas (ver Tabla 6.6).

Tabla 6.6. Espesores de placa del material PC/ABS en las diferentes zonas del material macizo y espumado de 3 mm

Espesor [mm]		
	Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm
A	$3,19 \pm 0,03$	$3,14 \pm 0,01$
B	$3,12 \pm 0,04$	$3,07 \pm 0,04$
C	$3,21 \pm 0,03$	$3,06 \pm 0,01$

Como resulta obvio, en las tres zonas puede observarse que, puesto que en nuestro caso hemos fijado el objetivo de reducción de peso en un 10%, al aumentar el espesor de la placa, aumenta el volumen de ésta y por lo tanto, con el mismo peso, la densidad disminuye. Por ese motivo, la densidad del material microespumado con 3 mm de espesor es superior a la del material espumado con un espesor de 3,3 mm.

6.4. Caracterización mecánica – Ensayos de tracción

A partir de los ensayos de tracción se han determinado, para cada una de las diferentes características de inyección, los valores medios de tensión, deformación y módulo de Young. Este tipo de ensayo es de gran utilidad para conocer propiedades importantes del material que se va a utilizar como el Módulo de Young y la carga y deformaciones máximas que puede soportar el material antes de su rotura.

En el caso concreto de la automoción, no obstante, dependiendo de la funcionalidad de la pieza del automóvil que estemos estudiando, los requerimientos serán unos u otros. No todas las piezas sufren los mismos esfuerzos. Para poder analizar bien cada caso, es pertinente conocer los requerimientos específicos de las piezas en concreto, tanto los atribuibles a su uso final, como los necesarios para su ensamblaje.

En la Figura 6.7 se muestran las curvas tensión-deformación del ensayo de tracción de la zona B en dirección MD, para cada tipo de material. Y en la Figura 6.8, las de la zona B en dirección TD.

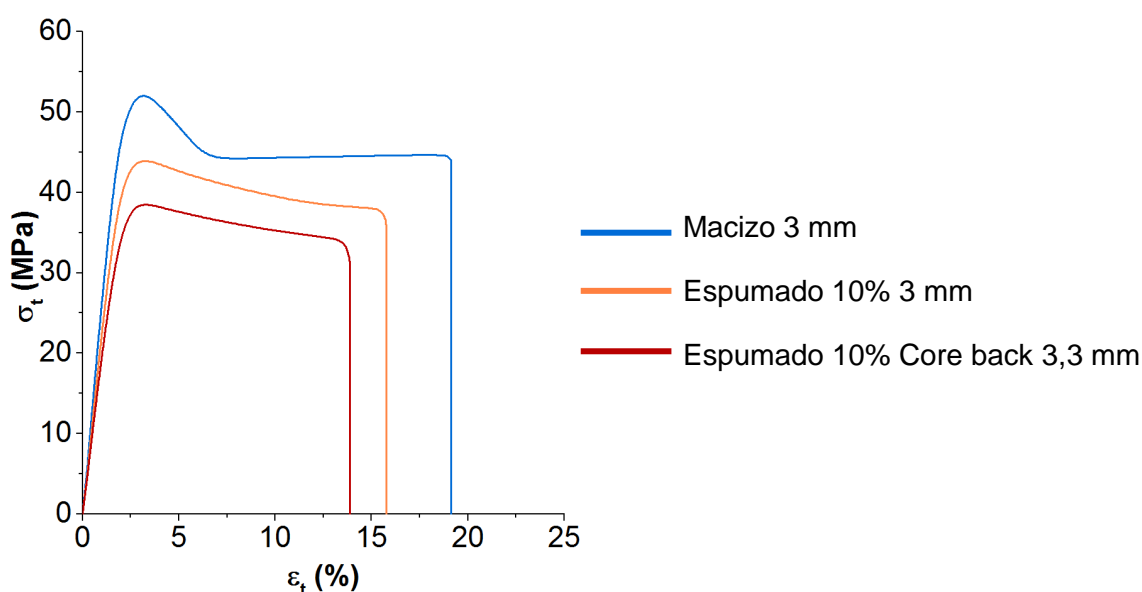


Figura 6.7. Curvas tensión-deformación ensayo de tracción en la dirección MD del PC/ABS en las distintas condiciones de inyección

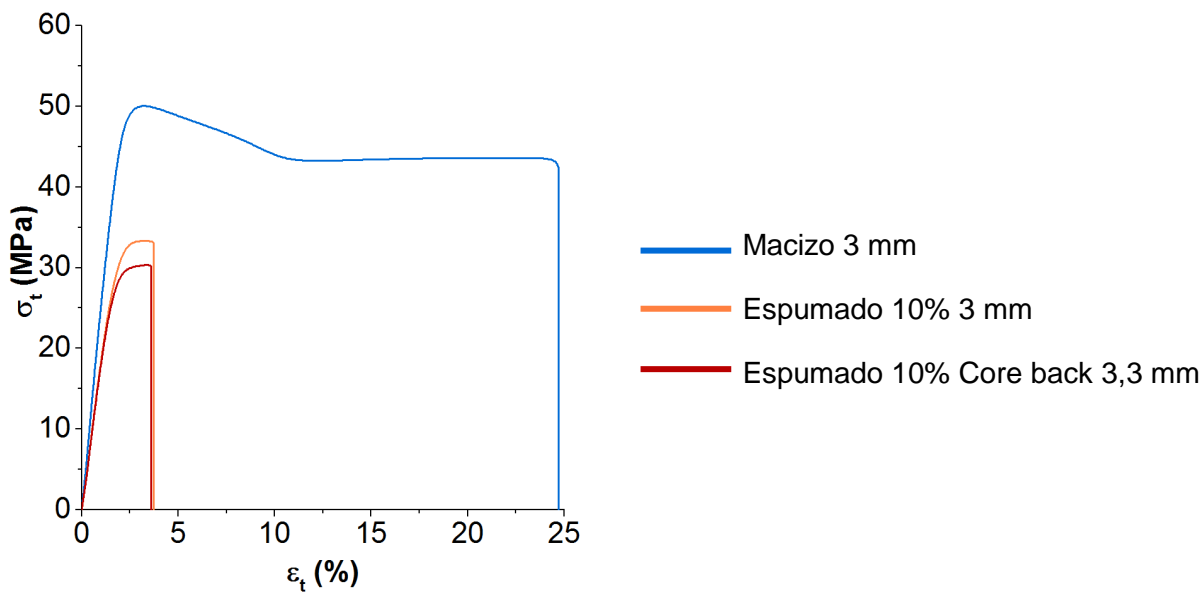


Figura 6.8. Curvas tensión-deformación ensayo de tracción en la dirección TD del PC/ABS en las distintas condiciones de inyección

En la curva del material macizo se pueden apreciar muy bien las diferentes etapas por las que pasa el material hasta su rotura. Al principio hay una zona de deformación elástica lineal, donde el material sometido a una tensión se deforma linealmente y de manera elástica. Durante este tiempo, si dejásemos de aplicar tensión, el material volvería a su estado inicial, sin presentar deformación permanente. Después de esta zona, se encuentra el punto de tensión de fluencia (límite elástico), este punto es el máximo que se encuentra tras la deformación lineal inicial y marca el cambio de la deformación elástica a la plástica, a partir de la cual, toda tensión aplicada al material, provocará en este una deformación permanente. Tras el límite elástico, la probeta empieza a tener estricción en su zona de menor anchura (formación de cuello) hasta la rotura. Así se produce también, en el resto de ensayos.

A grandes rasgos, se puede observar como el material microespumado en dirección TD, presenta bastante menos resistencia y deformación que en dirección MD.

Por lo que se puede apreciar en las curvas, el material espumado en dirección MD, presenta mayor ductilidad que en dirección TD donde el comportamiento de este es frágil, con muy poca deformación.

A continuación, en la tabla de resultados (Tabla 6.7), pueden compararse los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

Tabla 6.7. Resultados de módulo de Young (E), tensión de fluencia (σ_y), tensión de rotura (σ_b) y deformación de fluencia (ϵ_y) del material PC/ABS, en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

			Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm	
				Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
E [MPa]	MD	A	2438 ± 50	2118 ± 54	↓13	2017 ± 41	↓17
		B	2429 ± 16	2021 ± 54	↓17	1925 ± 43	↓21
		C	2441 ± 39	2063 ± 155	↓15	1964 ± 134	↓20
	TD	A	2427 ± 19	1807 ± 98	↓26	1708 ± 97	↓30
		B	2368 ± 60	1685 ± 26	↓29	1604 ± 17	↓32
		C	2404 ± 34	1740 ± 78	↓28	1657 ± 62	↓31
σ_y [MPa]	MD	A	52,4 ± 0,7	43,9 ± 0,8	↓16	41,8 ± 0,5	↓20
		B	52,0 ± 0,2	42,0 ± 1,7	↓19	40,0 ± 1,4	↓23
		C	51,4 ± 0,6	40,8 ± 1,4	↓21	38,9 ± 1,9	↓24
	TD	A	50,4 ± 0,4	35,4 ± 1,4	↓30	33,0 ± 1,8	↓34
		B	49,1 ± 0,7	31,0 ± 1,6	↓37	29,6 ± 1,5	↓40
		C	50,0 ± 1,0	32,6 ± 2,0	↓35	31,1 ± 1,8	↓38
σ_b [MPa]	MD	A	42,8 ± 1,1	34,6 ± 4,2	↓19	32,9 ± 4,0	↓23
		B	42,6 ± 1,0	33,9 ± 2,3	↓20	32,3 ± 2,0	↓24
		C	42,8 ± 1,3	35,6 ± 2,6	↓17	33,9 ± 2,3	↓21
	TD	A	41,5 ± 1,5	34,3 ± 1,6	↓17	32,4 ± 1,6	↓22
		B	41,0 ± 1,0	31,0 ± 1,6	↓24	29,6 ± 1,5	↓28
		C	41,2 ± 1,6	32,6 ± 2,0	↓21	31,1 ± 1,8	↓25
ϵ_y [%]	MD	A	3,28 ± 0,11	3,43 ± 0,10	↑4	3,36 ± 0,11	↑2
		B	3,27 ± 0,12	3,30 ± 0,10	↑1	3,23 ± 0,08	↓1
		C	3,30 ± 0,07	2,87 ± 0,27	↓13	2,82 ± 0,27	↓15
	TD	A	3,16 ± 0,09	3,61 ± 0,37	↑14	3,43 ± 0,33	↑8
		B	3,15 ± 0,09	2,73 ± 0,12	↓13	2,67 ± 0,20	↓15
		C	3,21 ± 0,09	2,87 ± 0,16	↓11	2,81 ± 0,24	↓12

En los resultados se puede observar que, mientras que en el material macizo no se encuentran grandes diferencias de resultados entre la dirección MD y la TD, en las placas microespumadas, los resultados de módulo de tracción y de tensión de fluencia, son superiores en MD que en TD aproximadamente un 12% y un 22% respectivamente. Puesto que este efecto solo se produce en el material microespumado, puede atribuirse a una mayor afectación de la espumación sobre estas propiedades en dirección TD. Teniendo en cuenta que el material no tiene cargas, se considera que esto puede ser debido a la orientación celular que se ha podido observar en las imágenes tomadas mediante

microscopía electrónica. En cualquier caso, el material microespumado presenta mayor fragilidad que el material macizo y tiene mayor elasticidad en dirección MD que en TD.

En el caso de la tensión de rotura, la diferencia hallada entre las dos direcciones de los materiales microespumados es mucho menor, en torno a un 6%. Por lo que podríamos concluir que aunque la orientación celular del material provoca que el material microespumado tenga una mayor elasticidad en dirección MD que en TD, la tensión de rotura en el material espumado es del mismo orden en las dos direcciones.

Respecto a la deformación de fluencia, no se aprecian diferencias significativas en cuanto a las direcciones de ensayo, ni en el material macizo ni en el espumado.

En general, en el material macizo no se aprecia una relación clara de resultados con respecto a la zona de extracción de probetas en referencia al punto de inyección. Mientras que en el material microespumado, se puede observar que en las zonas más próximas al punto de inyección las propiedades son ligeramente más elevadas que al alejarse de éste. La causa de este efecto podría ser el empaquetamiento de material que se da en las fases de mantenimiento o postpresión del ciclo de inyección. Este empaquetamiento sería debido a que una vez llenado el molde, para contrarrestar las contracciones del material mientras este solidifica, se realiza una postpresión para provocar la entrada de más material en la cavidad.

Con la disminución de la densidad aparente del material, se hallan decrementos de las propiedades de hasta un 40% en el caso de la tensión de fluencia. Aunque no se observan diferencias significativas entre los dos materiales espumados, al aumentar el espesor de 3 a 3,3 mm, el modulo disminuye aproximadamente un 5% y la tensión de fluencia y de rotura alrededor de un 4%. Por lo que, como ya se había determinado en investigaciones llevadas a cabo anteriormente, la densidad aparente, es uno de los factores con mayor afectación sobre las propiedades mecánicas [31]. Esto es debido a que a densidades menores, el material presenta menor superficie de trabajo. Hay mayor parte del volumen que está ocupado por aire y no por el propio material, la densidad celular en el caso del espumado de 3,3 mm era más de 20 veces mayor que en el de 3 mm.

Por lo que hace referencia a la deformación de fluencia, no se observa una tendencia clara en cuanto a disminución de propiedades a la vez que se produce la disminución en la densidad aparente. De hecho, no se aprecia ni tan solo una clara relación de pérdida de capacidad de deformación debida a la microespumación ya que en algunos casos, se hallan mayores deformaciones de fluencia en el material espumado (hasta un 14% más) que en el macizo.

Esta es claramente la propiedad del análisis de tracción que menos afectada se ve por la microespumación.

6.5. Caracterización mecánica – Ensayos de flexión

Los ensayos de flexión nos permiten estudiar principalmente la rigidez de los materiales, el comportamiento del material ante fuerzas perpendiculares a las caras de la probeta. Nos proveen de información sobre la máxima resistencia y el módulo de flexión, que se refiere a la elasticidad del material ante esfuerzos de éste tipo.

Este ensayo mecánico es de gran utilidad para la industria del automóvil, ya que las piezas de los vehículos pueden ser sometidas a esfuerzos de este tipo, ya sea a la hora de realizar el montaje de las mismas, por motivos de funcionalidad de la pieza, durante su vida útil en el automóvil o en casos particulares de colisiones, en las que se generan esfuerzos de flexión considerables. Por este motivo, es importante conocer y/o predecir el comportamiento de los materiales en este sentido, tanto para asegurar su funcionalidad como la seguridad.

Entre las principales limitaciones de este ensayo, se encuentra la imposibilidad de obtener información relevante en materiales poliméricos blandos como son las espumas flexibles y los cauchos. En este estudio por tanto, el ensayo se puede realizar sin ninguna dificultad.

El parámetro más importante que se obtiene de un ensayo de flexión es el módulo de flexión. En función del número de puntos de apoyo pueden realizarse varios tipos de ensayos de flexión: flexión en tres puntos, en cuatro puntos o incluso flexión de una viga en voladizo. En nuestro caso, el ensayo se realizó con tres puntos de apoyo.

En la Figura 6.9 se muestran las curvas tensión-deformación del ensayo de flexión de la zona B en dirección MD, para cada tipo de material. Y en la Figura 6.10, las de la zona B en dirección TD.

En general por lo que respecta a la flexión se observa que la microespumado en dirección MD tiene una menor afectación que en dirección TD.

Tanto el material macizo como el espumado, en las dos direcciones presentan un comportamiento dúctil.

A continuación, en la tabla de resultados 6.8 pueden compararse los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

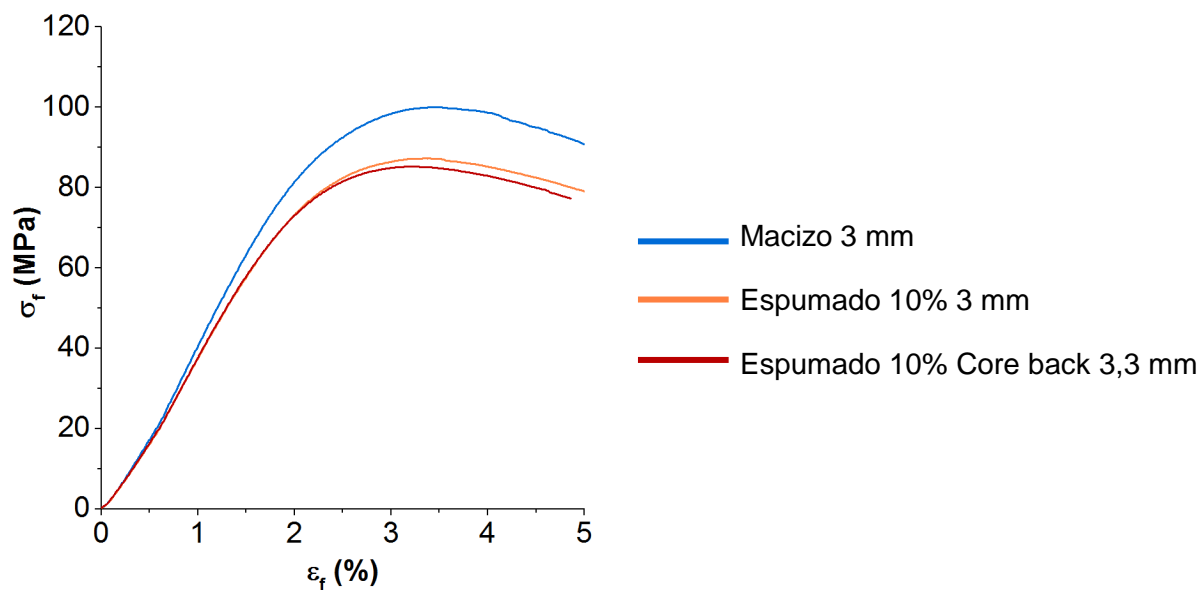


Figura 6.9. Curvas tensión-deformación ensayo de flexión en la dirección MD del material PC/ABS en las diferentes condiciones de inyección

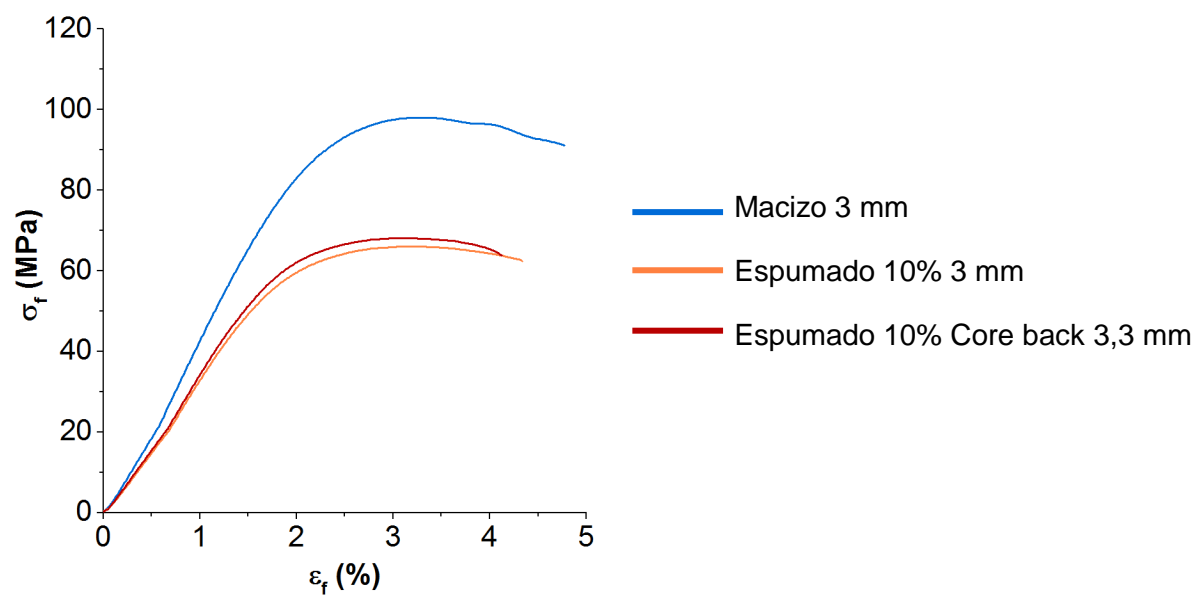


Figura 6.10. Curvas tensión-deformación ensayo de flexión en la dirección TD del material PC/ABS en las diferentes condiciones de inyección

Tabla 6.8. Resultados de módulo de flexión (E_f), resistencia a la flexión (σ_f) y deformación de flexión (ϵ_f) del material PC/ABS en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

			Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm	
				Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
E_f [MPa]	MD	A	4959 ± 44	4275 ± 53	↓14	4300 ± 50	↓13
		B	4873 ± 89	4333 ± 56	↓11	4407 ± 52	↓10
		C	4889 ± 75	4367 ± 66	↓11	4313 ± 75	↓12
	TD	A	4821 ± 38	3680 ± 93	↓24	3685 ± 62	↓24
		B	4806 ± 76	3811 ± 76	↓21	3801 ± 88	↓21
		C	4838 ± 94	4237 ± 99	↓12	4059 ± 86	↓16
σ_f [MPa]	MD	A	103,1 ± 0,8	84,4 ± 0,8	↓18	84,3 ± 0,8	↓18
		B	101,6 ± 0,9	84,8 ± 1,6	↓16	85,2 ± 1,6	↓16
		C	100,8 ± 1,2	85,4 ± 1,7	↓15	84,1 ± 2,1	↓17
	TD	A	97,2 ± 0,9	68,6 ± 1,0	↓29	67,9 ± 0,7	↓30
		B	96,4 ± 1,1	66,1 ± 1,3	↓31	65,9 ± 1,7	↓32
		C	97,4 ± 1,9	74,7 ± 2,1	↓23	73,0 ± 2,0	↓25
ϵ_f [%]	MD	A	3,50 ± 0,02	3,36 ± 0,05	↓4	3,34 ± 0,05	↓4
		B	3,47 ± 0,06	3,32 ± 0,07	↓4	3,28 ± 0,05	↓6
		C	3,47 ± 0,02	3,21 ± 0,12	↓7	3,22 ± 0,12	↓7
	TD	A	3,30 ± 0,08	3,36 ± 0,04	↑2	3,31 ± 0,06	↑1
		B	3,33 ± 0,05	3,11 ± 0,09	↓7	3,07 ± 0,05	↓8
		C	3,40 ± 0,06	3,15 ± 0,15	↓7	3,15 ± 0,13	↓7

En el análisis de los resultados de módulo y de resistencia a la flexión, tal y como pasaba con el módulo de Young o con la tensión de fluencia, se puede observar cómo mientras que el material macizo presenta resultados similares en las dos direcciones, el microespumado presenta mayor módulo y resistencia a la flexión en la dirección MD que en la TD. Tal y como ya se había podido observar en estudios anteriores, la microespumación aumenta la anisotropía del material en cuanto a propiedades de flexión se refiere [30]. Excepto en la zona más alejada al punto de inyección en dirección TD, que en ese caso tanto el módulo como la resistencia a la flexión son más cercanos a los valores obtenidos en dirección MD. Esto puede ser debido a que en esta zona el espesor de la piel es mayor que en las otras dos. Además, en dicha zona, en la dirección del flujo de inyección, no se aprecia un gran número de celdas orientadas, cosa que también favorece a que no se produzca tanta anisotropía.

Por lo que respecta a la variación de propiedades en referencia a la variación de densidad aparente sobre las placas microespumadas, los resultados de las placas espumadas de los diferentes espesores (placas de 10% de reducción de peso con 3 mm de espesor y placas con 10% de reducción de peso con 3,3 mm de espesor mediante tecnología Core Back) no presentan grandes diferencias entre sí. Con respecto al material macizo, el material microespumado pierde en dirección MD entre un 10 y un 14% de módulo de flexión y un 16% aproximadamente de resistencia a la flexión. En dirección TD el módulo de flexión disminuye entre un 12 y un 24% mientras que la resistencia a la flexión entre un 25 y un 30%.

Tal y como ya se podía observar en la deformación de fluencia, en referencia a la deformación de flexión, no se aprecia una gran diferencia de resultados entre las dos direcciones de ensayo, ni entre las distintas distancias ensayadas con respecto al punto de inyección, ni entre el material macizo y los espumados, en algún caso el resultado de deformación en el material espumado llega a ser mayor que en el macizo. Por lo tanto, de entre las propiedades de flexión, la deformación también es la que se ve menos afectada por la espumación.

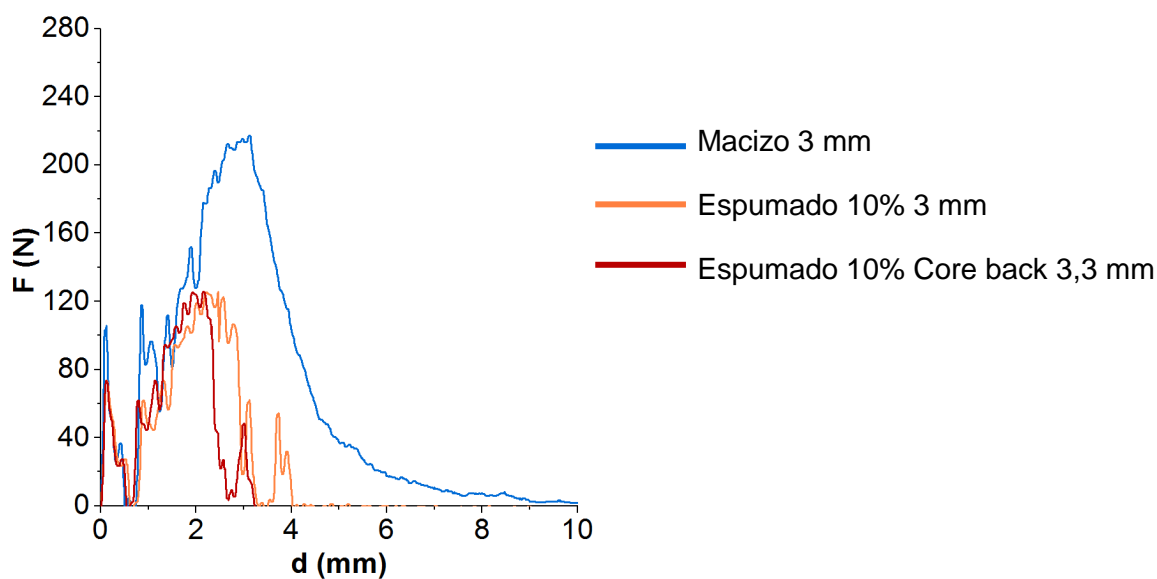
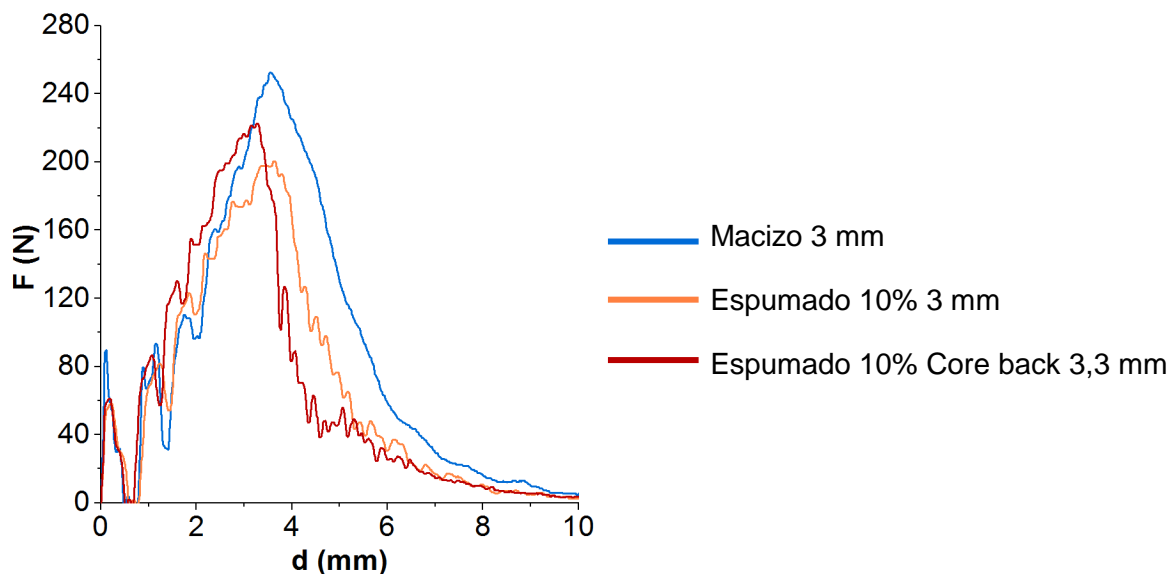
6.6. Caracterización mecánica – Ensayos de impacto

Los ensayos de impacto, nos proporcionan información sobre la tenacidad de los materiales, sobre la energía necesaria para romper una pieza de un material determinado.

El comportamiento de impacto se ve influenciado, entre otros factores, por la temperatura, la velocidad de choque y la presencia o no de entallas.

En el sector de la automoción, se considera esta propiedad de alta importancia, ya que permite predecir el comportamiento que tendrá una pieza frente a golpes abruptos. Cosa que a su vez, proporciona información de vital importancia para los análisis y cálculos de seguridad del automóvil frente a colisiones, etc.

En la Figura 6.11 se muestran las curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de impacto de la zona B en dirección de propagación de grieta MD, para cada tipo de material. Y en la Figura 6.12, las de la zona B en dirección de propagación de grieta TD.



En estas gráficas podemos ver como en algunos casos después de que se produzca la rotura existe una zona en la curva en la que se producen subidas de fuerza, esto es debido a que en esos casos, la probeta no ha llegado a romper del todo (rotura tipo bisagra), por lo que no cae del péndulo y este vuelve a chocar en diversas ocasiones. Este efecto no se ha tenido en cuenta a la hora de calcular la energía absorbida durante el ensayo.

A continuación, con la tabla de resultados (Tabla 6.9), se compararan los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

Tabla 6.9. Resultados de resistencia al impacto (a_{cN}) del material PC/ABS en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

		Resistencia al impacto (a_{cN}) [kJ/m²]				
		Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm	
			Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
MD	A	36,9 ± 2,8	25,4 ± 1,9	↓31	23,7 ± 1,6	↓36
	B	31,4 ± 2,3	21,7 ± 1,2	↓31	19,8 ± 0,7	↓37
	C	28,4 ± 2,8	23,6 ± 1,8	↓17	21,1 ± 1,2	↓26
TD	A	15,3 ± 0,9	7,2 ± 0,6	↓53	7,0 ± 0,5	↓54
	B	21,4 ± 1,0	6,2 ± 0,5	↓71	5,9 ± 0,3	↓72
	C	22,0 ± 2,0	8,4 ± 0,6	↓62	7,5 ± 0,7	↓66

En cuanto a la resistencia al impacto puede verse como ya el material macizo presenta una gran diferencia (en torno a un 60% de media) entre los resultados en dirección MD y los de la dirección TD. Esto puede deberse a la orientación de las cadenas poliméricas. Normalmente, éstas se ordenan en la dirección MD y esto provoca, que en esta dirección, la resistencia al impacto sea mayor que en la dirección TD. Esto es debido a que en la dirección del flujo de inyección, el impacto debe romper las cadenas poliméricas para lograr la ruptura de la probeta, cosa que tiene mayor requerimiento energético.

Además, como en la tracción y la flexión, por lo que respecta a la microespumación, ésta también tiene mayor efecto sobre la dirección TD que sobre la MD, llegando a observarse pérdidas de hasta un 72%.

No se aprecia una pérdida de resistencia a medida que nos alejamos del punto de inyección, pero tal y como pasaba en los ensayos de tracción, sí podemos observar que la pérdida de resistencia al impacto aumenta a medida que disminuimos la densidad aparente del material. En los materiales espumados, las celdas actúan como concentradores de tensiones, por lo tanto, la resistencia al impacto, disminuye con respecto al material macizo debido a la menor densidad, resistencia y capacidad de absorción de energía [33].

6.7. Propiedades específicas

En general, se ha verificado que con respecto a los módulos (tanto de tracción como de flexión) y a las deformaciones de fluencia y de flexión, el empeoramiento de comportamiento debido a la espumación está relacionado con la disminución de la densidad aparente del material [32]. Ya que si calculamos las propiedades específicas (ver Figuras 6.13, 6.14 y 6.15) podemos observar cómo la diferencia entre ambos materiales disminuye.

En las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15, pueden observarse las propiedades específicas de los ensayos mecánicos en el PC/ABS. Las propiedades específicas representadas en las figuras corresponden con los valores medios de cada propiedad específica, para cada condición de inyección y en las dos direcciones.

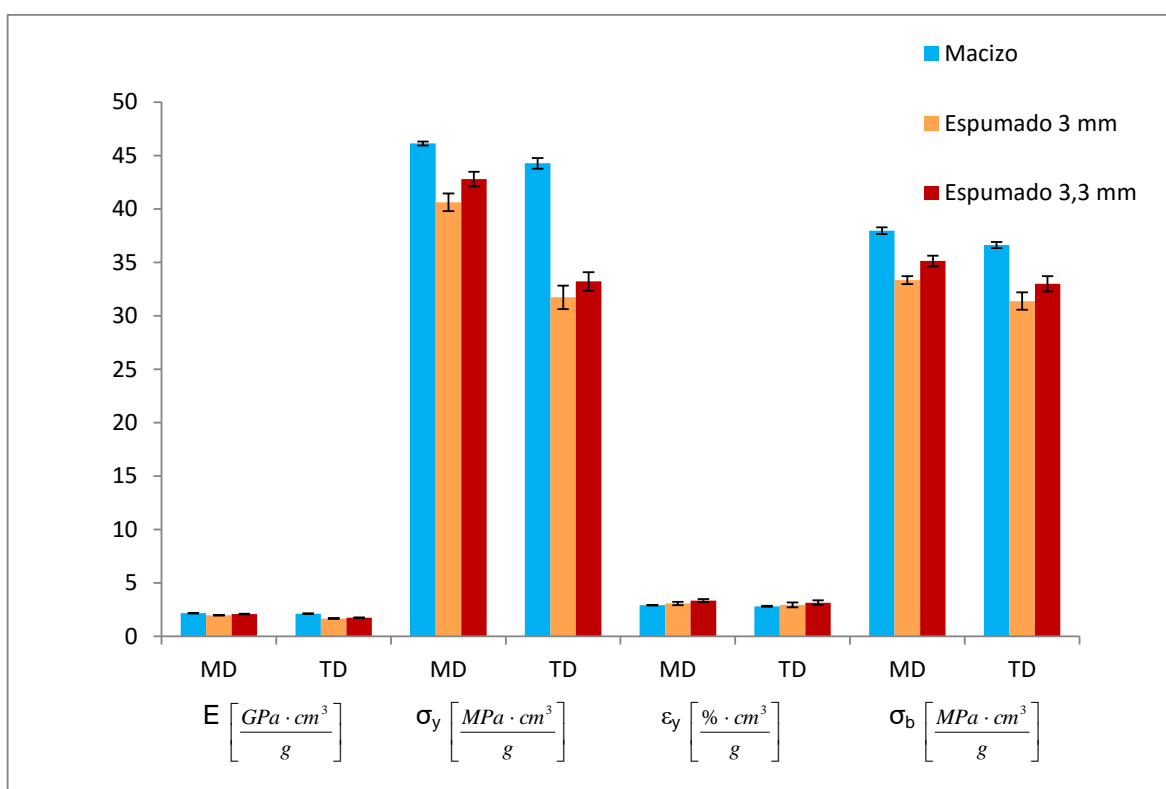


Figura 6.13. Propiedades específicas ensayos mecánicos de tracción del material PC/ABS en las dos direcciones (MD y TD)

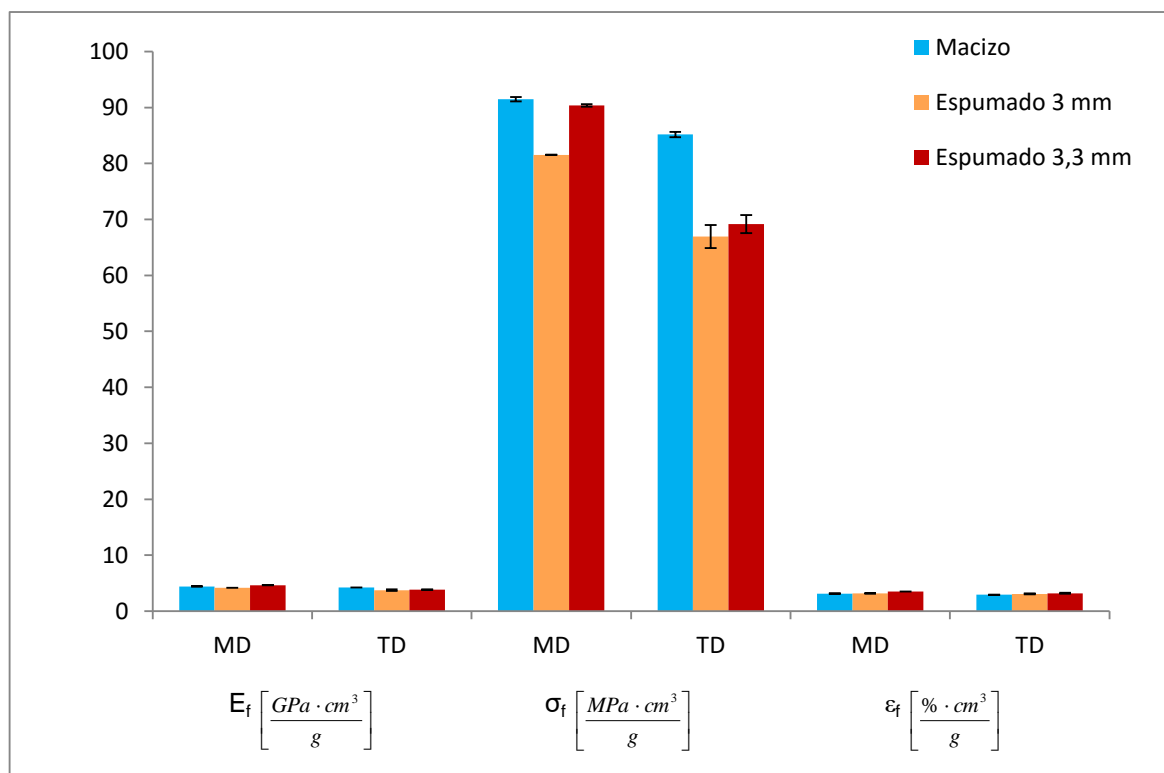


Figura 6.14. Propiedades específicas ensayo de flexión del material PC/ABS en las dos direcciones (MD y TD)

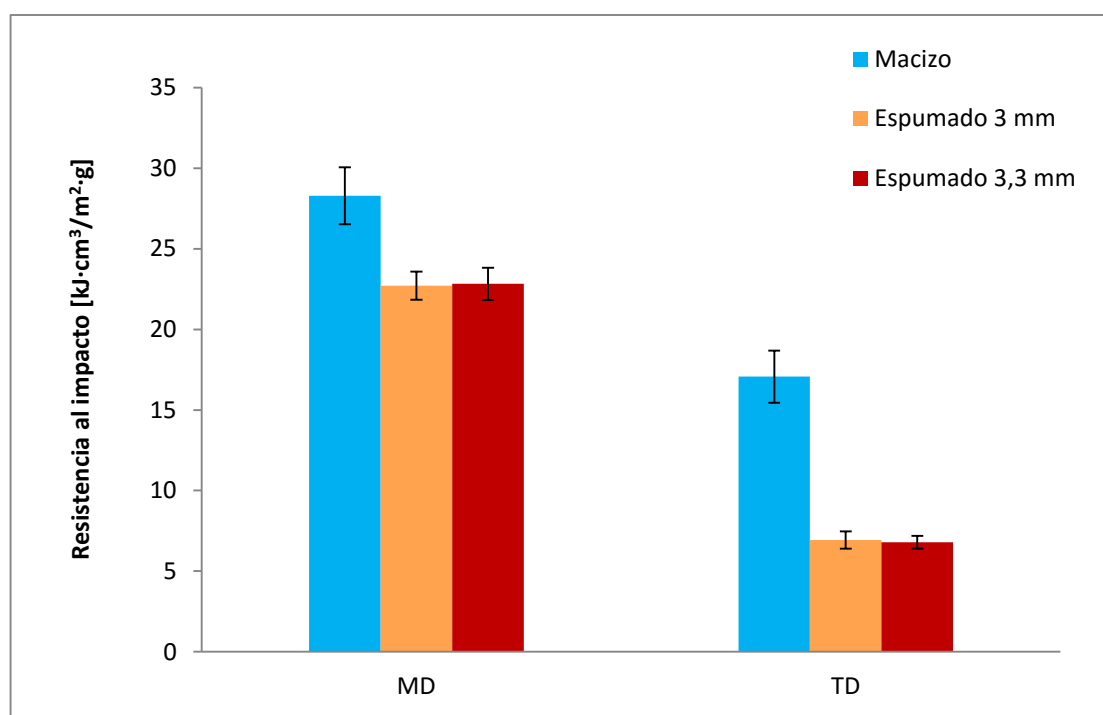


Figura 6.15. Propiedades específicas ensayos mecánicos de impacto del material PC/ABS en las dos direcciones (MD y TD)

7. Resultados y discusión material PP-GF30 (SABIC STAMAX Resin 30YM240)

7.1. Inspección visual

En la Figura 7.1 puede observarse el aspecto visual de las diferentes placas inyectadas del material PP-GF30.



Figura 7.1. Imagen de las placas inyectadas del material PP-GF30: 1) Macizo; 2) espumado 10%, 3 mm de espesor; 3) espumado 10%, 3,3 mm de espesor; 4) espumado 10%, 3,7 mm de espesor

Por los mismos motivos que hemos explicado antes para el PC/ABS, en este caso también, todas las placas espumadas presentan en su superficie zonas de color más claro. Sin embargo, a diferencia de lo que veíamos con el otro material, la diferencia de aspecto entre el material macizo y el espumado es mucho menos acusada y además el acabado superficial de las placas espumadas es regular y homogéneo (ver Figuras 7.2, 7.3 y 7.4).

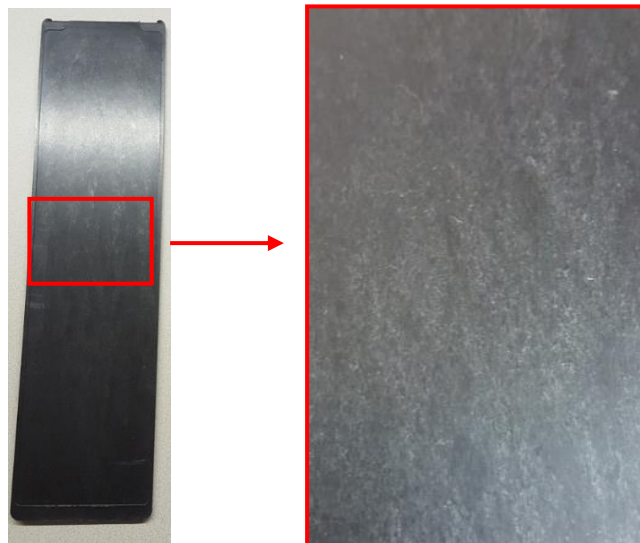


Figura 7.2. Detalle de la placa inyectada de PP-GF30 espumado 10%; 3 mm de espesor

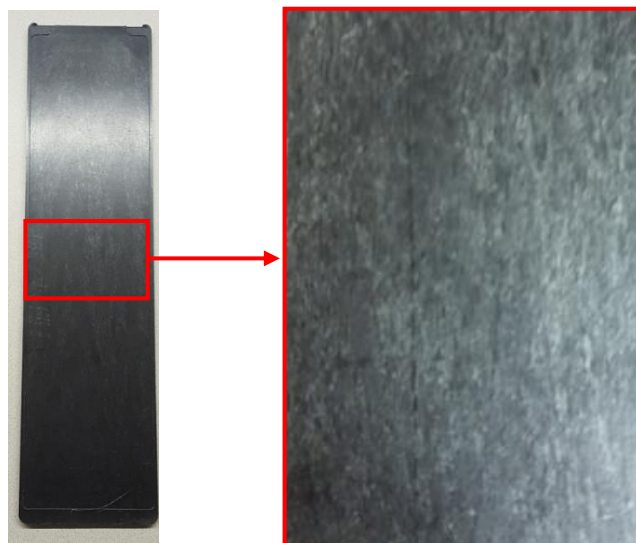


Figura 7.3. Detalle de la placa inyectada de PP-GF30 espumado 10%; 3,3 mm de espesor

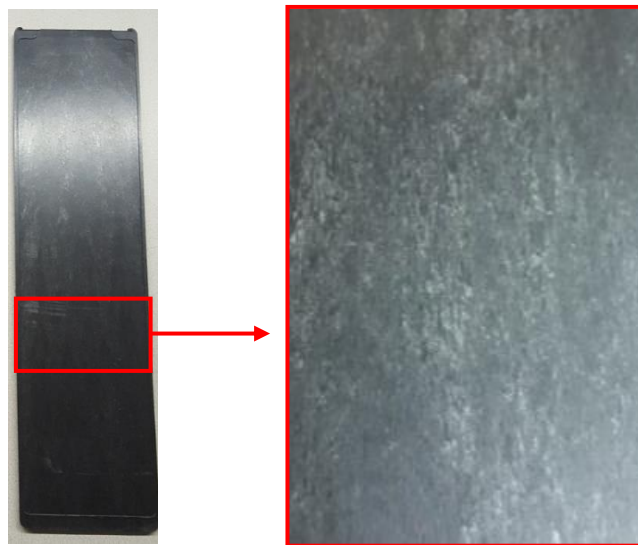


Figura 7.4. Detalle de la placa inyectada de PP-GF30 espumado 10%; 3,7 mm de espesor

Entre las diferentes placas espumadas (2, 3 y 4) prácticamente no se observan diferencias de aspecto.

7.2. Caracterización morfológica

Como en el caso del PC/ABS, para realizar el análisis de la estructura celular de las probetas del PP-GF30, también se han tomado dos imágenes de cada una de las zonas de la placa y de cada nivel de espumación (en este caso tres), en las dos direcciones. Una de estas será de la superficie total de la probeta con un aumento de x25 (ver resumen en Tabla 7.1) y otra más ampliada con un aumento de x50 (ver resumen en Tabla 7.2).

Tabla 7.1. Microscopía Electrónica de Barrido del PP-GF30, en las dos direcciones, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las distintas zonas de las placas (aumento x25)

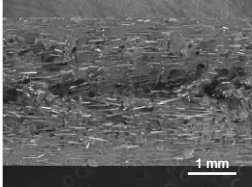
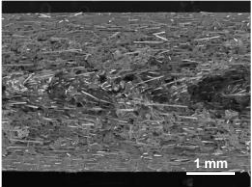
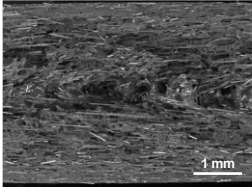
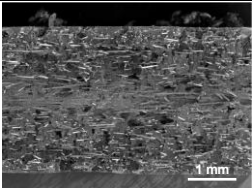
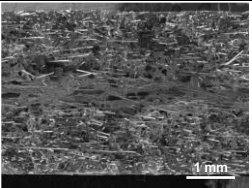
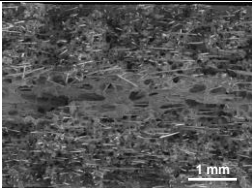
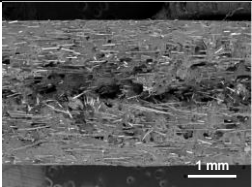
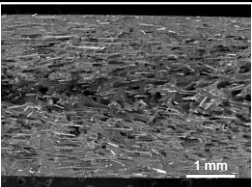
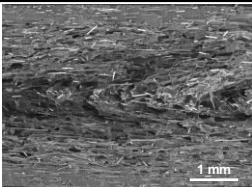
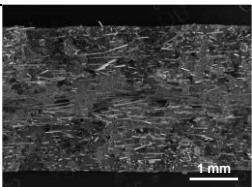
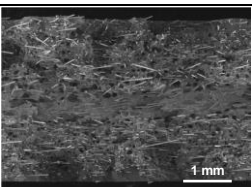
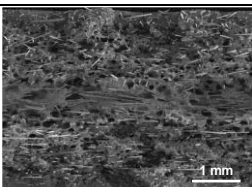
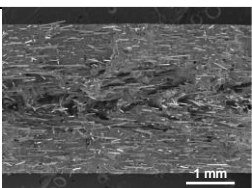
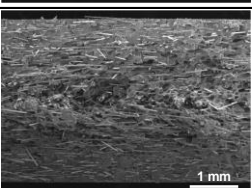
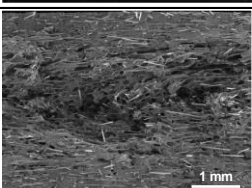
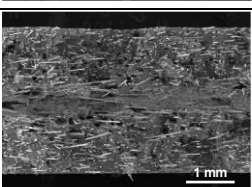
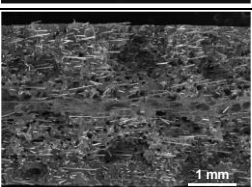
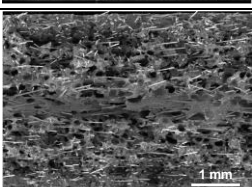
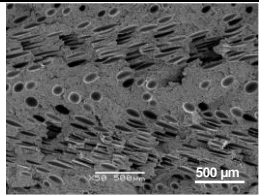
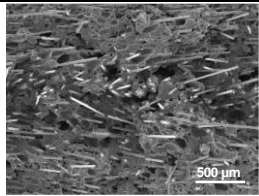
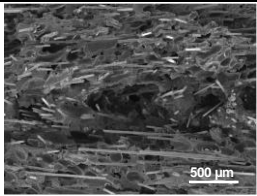
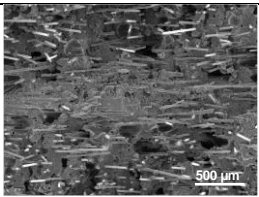
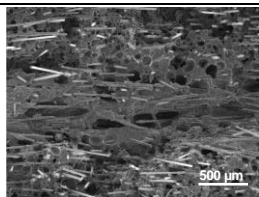
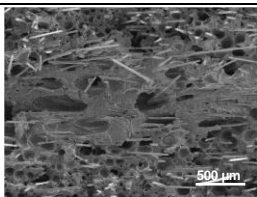
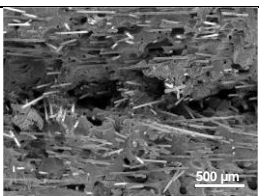
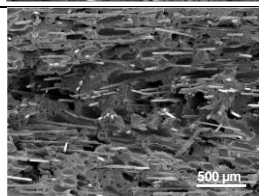
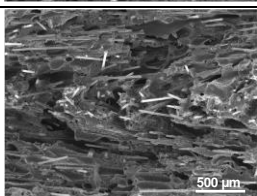
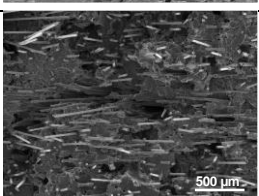
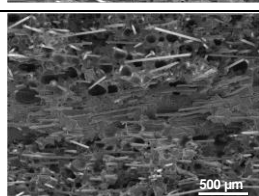
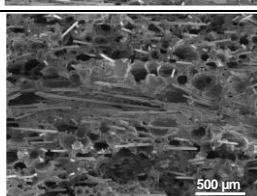
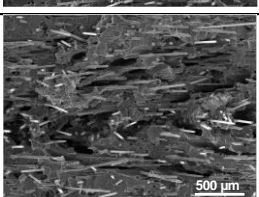
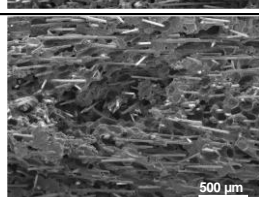
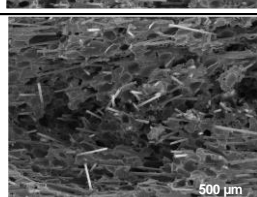
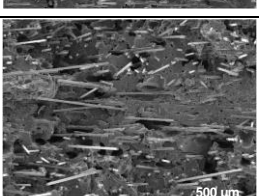
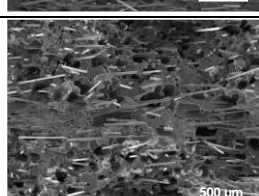
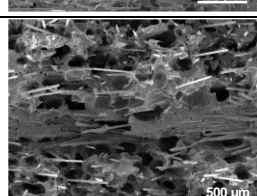
Zona	Dirección de observación	Espumado 10% 3 mm	Espumado 10% Core Back 3,3 mm	Espumado 10% Core Back 3,7 mm
A	MD			
	TD			
B	MD			
	TD			
C	MD			
	TD			

Tabla 7.2. Microscopía Electrónica de Barrido del PP-GF30, en las dos direcciones, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las distintas zonas de las placas (aumento x50)

Zona	Dirección de observación	Espumado 10% 3 mm	Espumado 10% Core Back 3,3 mm	Espumado 10% Core Back 3,7 mm
A	MD			
	TD			
B	MD			
	TD			
C	MD			
	TD			

A diferencia de lo que se veía en el PC/ABS, en este material, además de las celdas, también se aprecia la fibra de vidrio y su orientación.

En este caso, no se observa gran variación en cuanto a espesor de piel en función de la distancia al punto de inyección. En el caso de este material, la fibra ejerce de agente

nucleante y favorece la generación de celdas, cosa que puede hacer que no se observen variaciones de espesor de piel a lo largo de la placa.

En general la estructura y morfología celular podían observarse con mayor claridad en el PC/ABS, esto es debido a que la presencia de fibras en el PP-GF30 enmascara la imagen. A diferencia de lo que observábamos en el otro material, en este no se aprecian celdas alargadas próximas a la zona de la piel.

Si se compara la espumación sin y con Core Back, la espumación con Core Back de 3,3 mm de espesor es la que presenta una distribución más homogénea entre las diferentes zonas.

Por lo general, la zona del núcleo de la dirección TD presenta menor cantidad de celdas que la misma zona en la dirección MD.

De las imágenes obtenidas, se procede a realizar los siguientes análisis sobre la zona B de cada una de las placas espumadas, ya que es la zona central de la placa, tanto en dirección MD, como en TD.

7.2.1. Espesor de piel

A partir de las imágenes y tal y como se ha hecho para el PC/ABS, se hallan los espesores de piel de las diferentes condiciones de espumación, así como la proporción de espesor de piel en relación al espesor total (ver Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Resumen análisis espesor y proporción de piel del PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

Condición de inyección	Espesor piel [mm]	Espesor núcleo [mm]	Proporción piel [%]
Espumado 10% 3 mm	0,49	1,98	33,1
Espumado 10% Core Back 3,3 mm	0,40	2,51	24,2
Espumado 10% Core Back 3,7 mm	0,34	3,00	18,5

Tal y como pasaba en el PC/ABS y por las mismas razones ya explicadas en el punto 6.2.1, a medida que aumenta la cavidad del molde, disminuye el espesor de piel. Esto, conjuntamente con el aumento de espesor total, explica que exista una diferencia de alrededor de un 15% entre la proporción de piel del espumado de 3 mm y el de 3,7 mm.

7.2.2. Estudio de celdas

Siguiendo la misma sistemática que para el otro material, empleamos las imágenes de mayor aumento (x50) para ajustar el umbral de color de cada imagen y poder aislar así las celdas del fondo.

Una vez que las tenemos aisladas, se realiza mediante el *software* IgorPro, el análisis de los tamaños de celdas y la densidad celular (siguiendo la ecuación 5.2 y 5.3 del capítulo 5). Ver resultados en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Resumen análisis de celdas del PP-GF30 en las tres condiciones de inyección espumadas

Condición de inyección	Dirección	Diámetro mínimo [μm]	Diámetro máximo [μm]	N_0 [celdas/ cm^3]
Espumado 10% 3 mm	MD	11	165	$4,2 \times 10^5$
	TD	10	125	$3,7 \times 10^5$
Espumado 10% Core Back 3,3 mm	MD	10	346	$7,3 \times 10^5$
	TD	10	223	$6,0 \times 10^5$
Espumado 10% Core Back 3,7 mm	MD	4	420	$9,1 \times 10^5$
	TD	3	324	$9,8 \times 10^5$

Como se puede observar, en este caso, la diferencia de densidad celular entre las diferentes espumaciones no es tan acusada como en el caso del otro material. Sin embargo sí que se sigue observando un aumento de número de celdas a medida que aumenta el espesor, habiendo una diferencia de más del doble entre el material de 3 mm y el de 3,7 mm.

Respecto al tamaño de celda, podemos apreciar que el mínimo es el mismo tanto para la espumación de 3 mm como para la de 3,3 mm. Sin embargo en la de 3,3 mm, el diámetro máximo es el doble de grande que en la de 3 mm. A medida que aumenta el espesor de placa, también aumenta la diferencia de diámetro de las celdas. En el caso de la placa de 3,7 mm, el tamaño mínimo es un tercio del que se observa para los otros dos espesores, pero el diámetro máximo es 2,5 veces mayor que el de la placa de 3 mm. Esto es coherente con las observaciones apuntadas en cuanto al espesor de piel. En las placas espumadas de mayor espesor, la temperatura en el núcleo de la placa tarda más tiempo en disminuir, el polímero se mantiene durante más tiempo fundido y esto permite un mayor crecimiento celular en esta zona.

Por lo que respecta a los tamaños de celda, en la Figura 7.5 se puede observar la frecuencia con la que encontramos cada uno de los tamaños de celda en las diferentes condiciones de espumación y en las distintas direcciones.

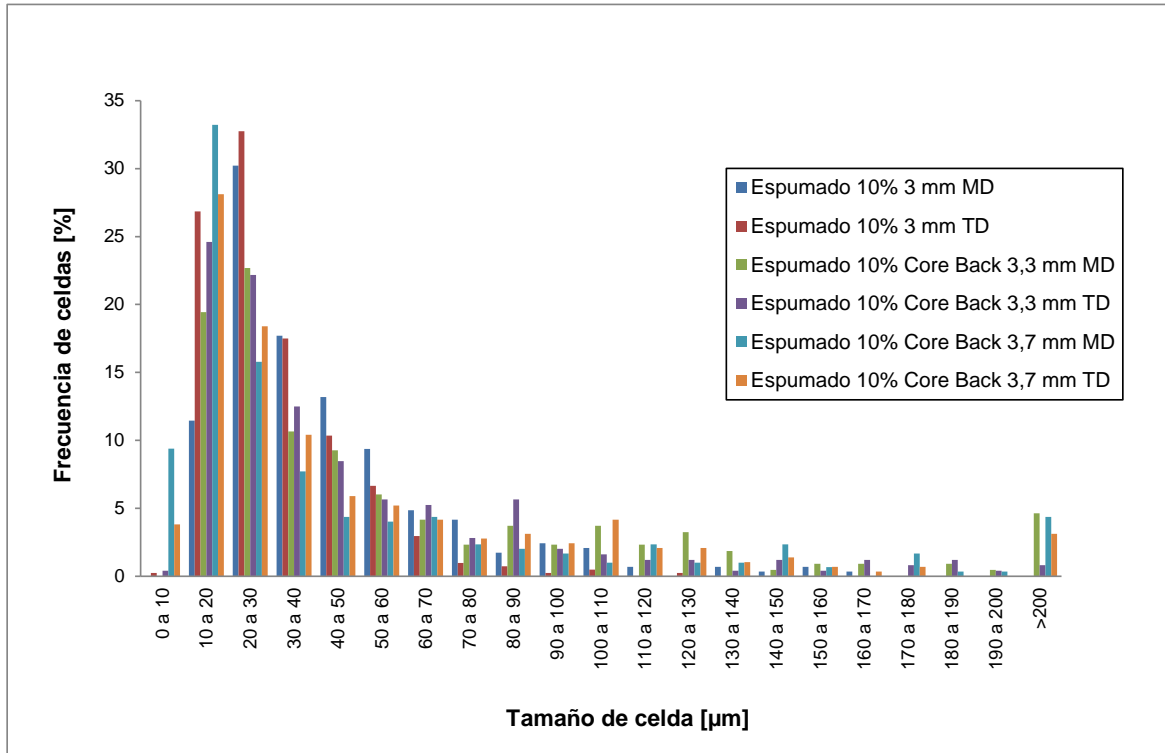


Figura 7.5. Histograma de frecuencias de tamaño de celda del material PP-GF30, en las diferentes condiciones de inyección espumadas y en las dos direcciones

Como se puede observar en la gráfica, entre un 70 y un 80% de celdas tienen un diámetro de entre 10 y 30 µm.

Por lo que respecta a las diferencias entre los distintos espumados y las diferentes direcciones, en este caso no se observan grandes diferencias, la distribución celular es similar en todos los espumados y en las dos direcciones.

7.3. Densidad aparente

Como en el caso del PC/ABS, para el material PP-GF30, también se ha buscado en todos los casos, una reducción de peso del 10%. En placas de 3 mm de espesor y en placas con

apertura de cavidad de molde (core back) hasta los 3,3 y hasta los 3,7 mm de espesor. En todas las espumaciones se emplea la misma cantidad de agente espumante.

En la Tabla 7.5, puede verse un resumen de las densidades halladas en las diferentes placas (material macizo y material espumado) en las distintas zonas con respecto al punto de inyección (Zona A: zona más próxima al punto de inyección; Zona B: zona central de las placas; Zona C: zona más alejada del punto de inyección).

Tabla 7.5. Resultados de densidad aparente del material PP-GF30 en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

	Densidad (ρ)						
Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm		Espumado 10% 3,7 mm		
	Valor absoluto [g/cm ³]	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto [g/cm ³]	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto [g/cm ³]	Δ_{m-e} [%]	
A	1,12 ± 0,02	0,99 ± 0,01	↓11	0,92 ± 0,02	↓18	0,83 ± 0,01	↓26
B	1,12 ± 0,02	1,00 ± 0,01	↓11	0,92 ± 0,01	↓18	0,83 ± 0,01	↓26
C	1,09 ± 0,02	1,00 ± 0,02	↓9	0,91 ± 0,01	↓17	0,82 ± 0,02	↓25

En el caso del PP-GF30, a diferencia de lo que pasaba en el material PC/ABS, en las placas de 10% de reducción en peso manteniendo los 3 mm de espesor sí que llega a materializarse la disminución del 10% en la densidad.

Al ir aumentando el espesor de placa manteniendo el mismo peso (con el 10% de reducción respecto al material macizo), obtenemos una reducción de densidad aparente.

7.4. Caracterización mecánica - Ensayos de tracción

En la Figura 7.6 se muestran las curvas tensión-deformación del ensayo de tracción de la zona B en dirección MD para cada tipo de material. Y en la Figura 7.7, las de la zona B en dirección TD.

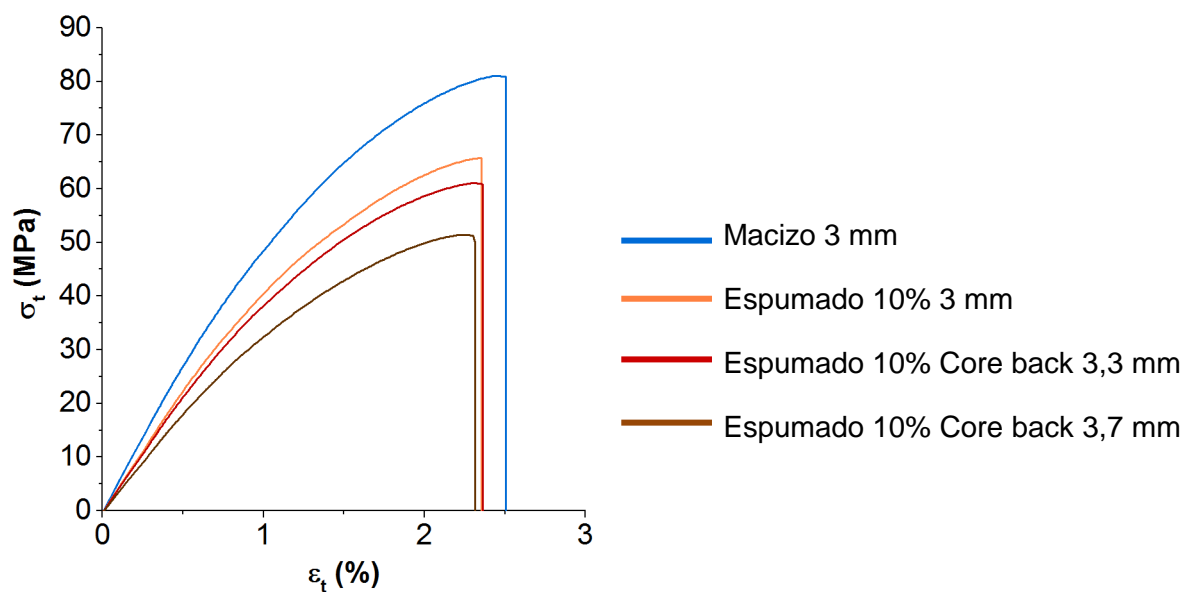


Figura 7.6. Curvas tensión-deformación ensayo de tracción en la dirección MD del material PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

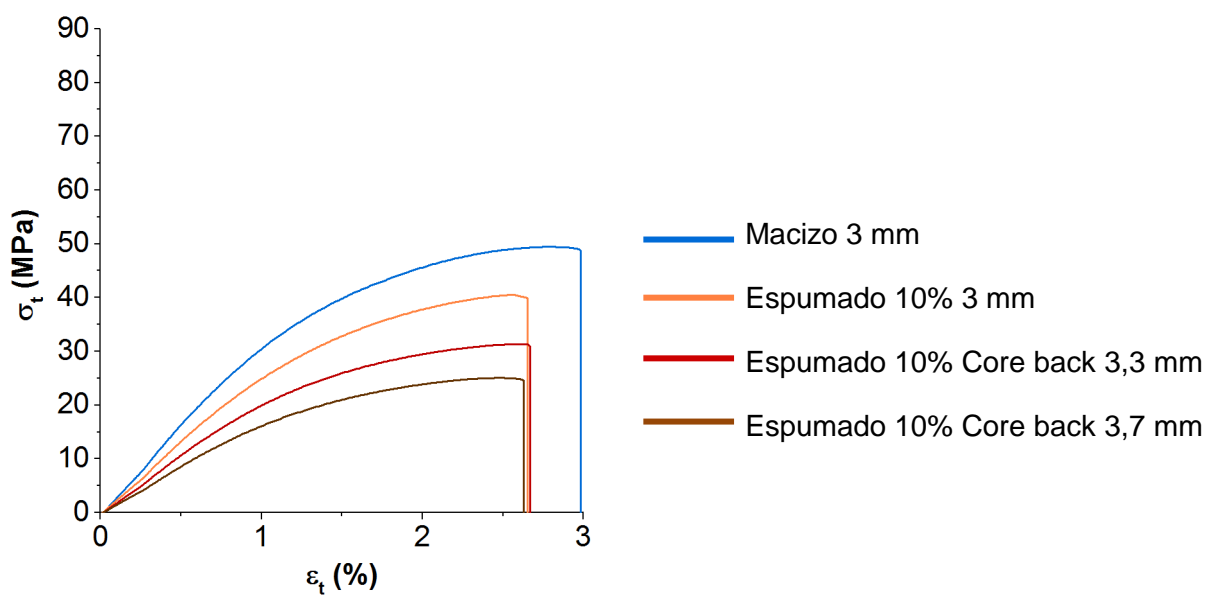


Figura 7.7. Curvas tensión-deformación ensayo de tracción en la dirección TD del PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

En términos generales se puede observar como el material en dirección MD presenta una mejor resistencia a la tracción que en dirección TD.

Como se puede observar en las gráficas, a diferencia del PC/ABS, el PP-GF30, prácticamente no presenta deformación permanente. Su deformación es prácticamente elástica hasta que el material rompe.

A continuación, en la tabla de resultados 7.6, pueden compararse los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

Tabla 7.6. Resultados de módulo de Young (E), tensión de rotura (σ_b) y deformación de rotura (ϵ_b) del material PP-GF30 en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

			Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm		Espumado 10% 3,7 mm	
				Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
E [MPa]	MD	A	5013 ± 107	3982 ± 111	↓21	3770 ± 104	↓25	3341 ± 75	↓33
		B	5504 ± 86	4623 ± 120	↓16	4288 ± 57	↓22	3773 ± 48	↓31
		C	5501 ± 120	4713 ± 224	↓14	4310 ± 64	↓22	3698 ± 127	↓33
	TD	A	3421 ± 95	2856 ± 125	↓17	2223 ± 125	↓35	1905 ± 90	↓44
		B	3213 ± 67	2552 ± 36	↓21	2006 ± 52	↓38	1654 ± 73	↓49
		C	3128 ± 58	2468 ± 102	↓21	1968 ± 70	↓37	1791 ± 98	↓43
σ_b [MPa]	MD	A	72,6 ± 2,3	56,6 ± 3,8	↓22	52,1 ± 1,7	↓28	46,5 ± 1,8	↓36
		B	79,6 ± 1,8	65,5 ± 1,9	↓18	59,3 ± 1,5	↓26	50,1 ± 1,8	↓37
		C	81,2 ± 1,0	68,3 ± 4,7	↓16	60,3 ± 1,4	↓26	50,8 ± 2,0	↓38
	TD	A	52,5 ± 1,8	44,1 ± 1,9	↓16	34,0 ± 1,8	↓35	28,4 ± 1,5	↓46
		B	49,3 ± 1,3	40,6 ± 0,6	↓18	29,5 ± 1,1	↓40	24,8 ± 0,4	↓50
		C	47,6 ± 0,5	37,3 ± 1,0	↓22	29,3 ± 1,2	↓39	26,1 ± 1,6	↓45
ϵ_b [%]	MD	A	2,46 ± 0,10	2,24 ± 0,24	↓9	2,24 ± 0,12	↓9	2,25 ± 0,06	↓9
		B	2,31 ± 0,18	2,11 ± 0,16	↓8	2,11 ± 0,22	↓9	2,02 ± 0,19	↓12
		C	2,48 ± 0,06	2,12 ± 0,25	↓14	2,15 ± 0,18	↓13	2,07 ± 0,08	↓16
	TD	A	2,77 ± 0,04	2,27 ± 0,23	↓18	2,49 ± 0,10	↓10	2,45 ± 0,18	↓11
		B	2,59 ± 0,12	2,46 ± 0,13	↓5	2,46 ± 0,12	↓5	2,28 ± 0,17	↓12
		C	2,54 ± 0,14	2,34 ± 0,21	↓8	2,36 ± 0,16	↓7	2,32 ± 0,16	↓9

Tanto el módulo de Young como la resistencia a la rotura en dirección MD son en todos los casos (tanto material macizo como microespumado) superiores a los obtenidos en dirección TD. En el material macizo se observa una diferencia de entre un 35 y un 40% y en los materiales espumados entre un 36 y un 50%. En el caso del PC/ABS, en general, solo observábamos esta diferencia entre las dos direcciones en los materiales espumados. El hecho de que en este caso también lo observemos en el material macizo es debido al

refuerzo proporcionado por la fibra de vidrio. Ésta se orienta generalmente en dirección del flujo de inyección, y por lo tanto, aporta resistencia a esta dirección pero no ejerce ningún trabajo en la otra. Por lo tanto en este caso, la propia carga del material favorece el mejor comportamiento del material en la dirección MD, y además, la espumación, por efecto de la fibra de vidrio ayuda a la orientación y distribución de las celdas y también afecta en mayor medida a la dirección TD que a la MD.

Mientras que para el PC/ABS no se observaba una relación clara entre la distancia al punto de inyección y los resultados obtenidos, para el PP-GF30 tenemos situaciones diferentes para las dos direcciones. En la dirección del flujo de inyección se puede observar que la zona más próxima al punto de inyección (zona A), presenta valores de módulo ligeramente inferiores a los de las zonas más alejadas. Sin embargo en la dirección TD pasa justo lo contrario. Los resultados de la zona más próxima al punto de inyección (zona A) son superiores a los de las zonas más alejadas. Esto podría deberse a que en la dirección MD, dirección en la que se orienta la fibra de vidrio, podríamos tener en la zona más próxima al punto de inyección una mayor turbulencia e inestabilidad y esto podría provocar una orientación de la fibra más aleatoria que en las zonas más alejadas.

Como ya veíamos en el otro material, a medida que disminuye la densidad aparente de las placas (mayor espesor de placa) se ven disminuidos el módulo de Young y la tensión de rotura. Esto pasa en todas las zonas analizadas, tanto en la dirección MD como en la TD.

En comparación con el PC/ABS, el módulo de Young, en las mismas condiciones de microespumación, presenta un decremento similar en ambos materiales. Sin embargo, en el caso de la tensión de rotura, la microespumación provoca una mayor disminución sobre el PP-GF30, ya que mientras en el PC/ABS, se observaban pérdidas de hasta un 28%, en el polipropileno, a igualdad de condiciones (espumado con un 10% menor de peso y Core back hasta 3,3 mm de espesor) se observan disminuciones de tensión de rotura de hasta un 40%.

Por lo que respecta a la deformación de fluencia, de manera análoga a lo que sucedía en el PC/ABS, no existe la misma tendencia clara en cuanto a disminución de propiedades a la vez que se produce la disminución en la densidad aparente. Ni tampoco existe una diferencia significativa entre las dos direcciones por lo que respecta a disminución de deformación de fluencia debido a la espumación.

7.5. Caracterización mecánica - Ensayos de flexión

En la Figura 7.8 se muestran las curvas tensión-deformación del ensayo de flexión de la zona B en dirección MD, para cada tipo de material. Y en la Figura 7.9 de la zona B en dirección TD.

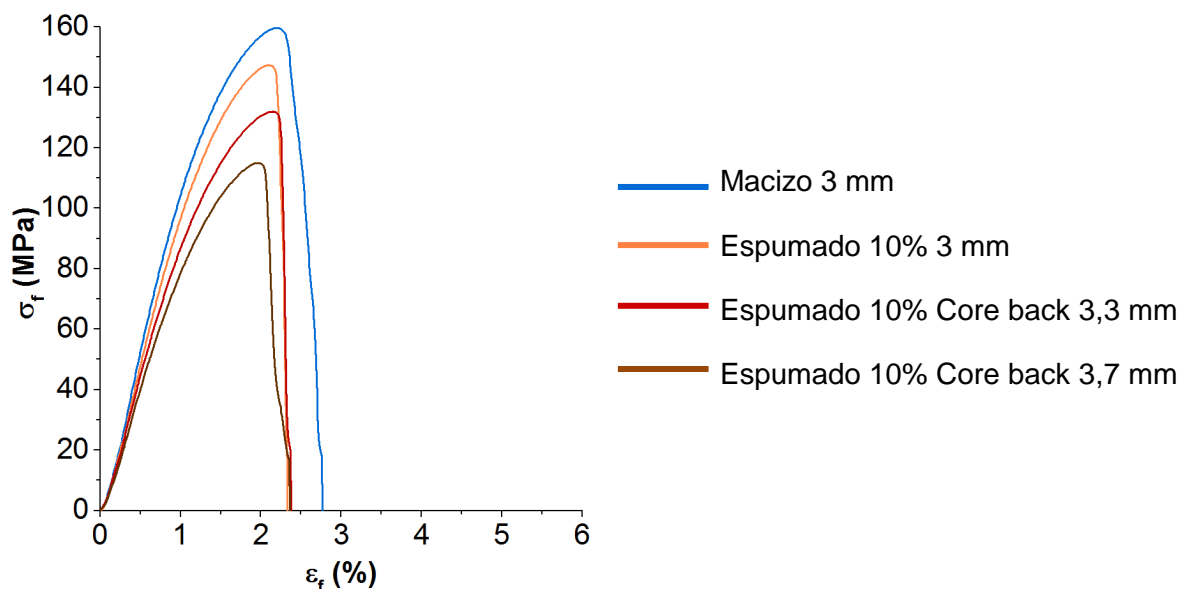


Figura 7.8. Curvas tensión-deformación ensayo de flexión en la dirección MD del PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

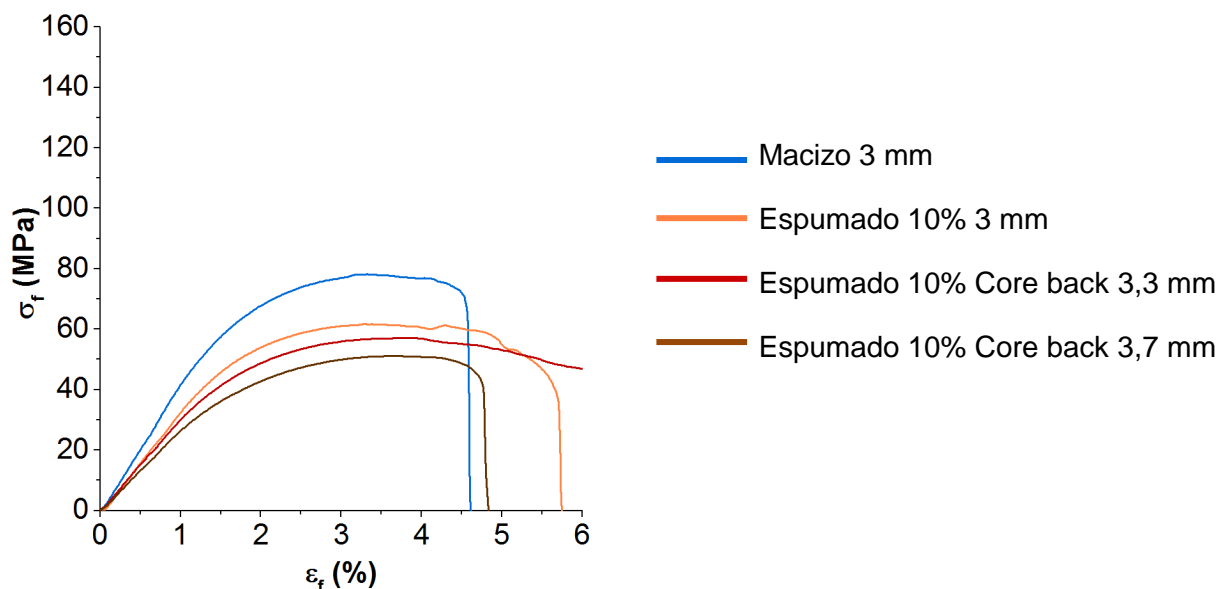


Figura 7.9. Curvas tensión-deformación ensayo de flexión en la dirección TD del PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

En general por lo que respecta a la flexión, se observa que en dirección TD, el material se deforma en mayor medida que en dirección MD.

En comparación con el PC/ABS, el material presenta menor ductilidad. Mientras que en las curvas de tensión-deformación del ensayo de flexión del PC/ABS se podía apreciar que el material no rompía en la flecha preestablecida, en este caso, se ve como el PP-GF30 si lo hace.

A continuación, en la Tabla 7.7, pueden compararse los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

Tabla 7.7. Resultados de módulo de flexión (E_f), resistencia a la flexión (σ_f) y deformación de flexión (ϵ_f) del material PP-GF30 en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

			Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm		Espumado 10% 3,7 mm	
				Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
E_f [MPa]	MD	A	10603 ± 56	9194 ± 98	↓13	8784 ± 88	↓17	8205 ± 89	↓23
		B	11504 ± 98	10349 ± 98	↓10	9828 ± 87	↓15	9164 ± 93	↓20
		C	10606 ± 71	9818 ± 58	↓7	9459 ± 99	↓11	8974 ± 95	↓15
	TD	A	4856 ± 97	3793 ± 78	↓22	3357 ± 91	↓31	2981 ± 88	↓39
		B	4274 ± 36	3409 ± 71	↓20	2991 ± 93	↓30	2546 ± 52	↓40
		C	4369 ± 62	3575 ± 77	↓18	3489 ± 98	↓20	3135 ± 99	↓28
σ_f [MPa]	MD	A	144,9 ± 1,7	126,7 ± 1,6	↓13	117,7 ± 1,9	↓19	105,7 ± 1,8	↓27
		B	158,4 ± 2,2	144,6 ± 2,2	↓9	131,0 ± 1,7	↓17	118,0 ± 2,7	↓25
		C	155,4 ± 3,0	145,9 ± 2,9	↓6	134,0 ± 3,1	↓14	117,4 ± 7,1	↓24
	TD	A	88,3 ± 1,6	71,0 ± 1,7	↓20	64,2 ± 1,8	↓27	58,2 ± 1,3	↓34
		B	78,4 ± 0,6	62,2 ± 1,2	↓21	57,0 ± 1,2	↓27	50,6 ± 0,4	↓35
		C	80,0 ± 1,8	65,6 ± 1,8	↓18	62,9 ± 2,3	↓21	57,1 ± 2,3	↓29
ϵ_f [%]	MD	A	2,24 ± 0,04	2,13 ± 0,07	↓5	2,16 ± 0,07	↓4	2,12 ± 0,09	↓5
		B	2,16 ± 0,06	2,06 ± 0,09	↓5	2,06 ± 0,08	↓5	2,02 ± 0,05	↓7
		C	2,34 ± 0,09	2,13 ± 0,08	↓9	2,13 ± 0,07	↓9	2,07 ± 0,07	↓11
	TD	A	3,33 ± 0,12	3,44 ± 0,14	↑3	3,62 ± 0,10	↑8	3,80 ± 0,10	↑14
		B	3,44 ± 0,10	3,39 ± 0,11	↓2	3,59 ± 0,10	↑4	3,63 ± 0,09	↑5
		C	3,41 ± 0,14	3,50 ± 0,15	↑3	3,48 ± 0,10	↑2	3,33 ± 0,12	↓2

En este caso a diferencia de lo que sucedía en el PC/ABS y tal y como se ha podido observar en los resultados de tracción, los resultados de flexión del material PP-GF30, en dirección MD son significativamente más elevados que en dirección TD. Alrededor de un 63% más elevados en el módulo de flexión y en torno a un 50% superiores en la resistencia a la flexión, tanto en el material macizo como en el microespumado. Como ya se ha

comentado anteriormente, esto es debido a la presencia de fibra de vidrio en el material. En las propiedades de flexión también se observa una afectación de la microespumación mayor en dirección TD que en MD.

No se observa una relación entre las variaciones de los resultados hallados y las diferentes zonas de las placas ensayadas (diferentes distancias desde el punto de inyección). Aunque en la dirección MD, en la mayoría de los casos, se obtienen mejores resultados en las zonas más alejadas del punto de inyección.

Aunque la diferencia no es muy acusada, a igualdad de densidad aparente, el PP-GF30 llega a tener una pérdida de módulo de flexión de hasta un 10% mayor que el PC/ABS. Mientras que la pérdida de resistencia de flexión debida a la espumación, en este material, es un 5% menor que en el PC/ABS.

Por lo que respecta a la deformación de flexión, en el caso del PP-GF30, a diferencia de lo que se observaba para el PC/ABS, existen diferencias entre las dos direcciones. En dirección TD la deformación es alrededor de un 60% mayor que en dirección MD (tanto para el material macizo como para el espumado).

Para el PP-GF30 no se observa una correlación entre la distancia al punto de inyección y la disminución de la deformación de flexión y no se puede apreciar una tendencia clara de pérdida de esta propiedad debida a la espumación.

7.6. Caracterización mecánica - Ensayos de impacto

En la Figura 7.10 se muestran las curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de impacto de la zona B en dirección MD para cada tipo de material. Y en la Figura 7.11 las de la zona B en dirección TD.

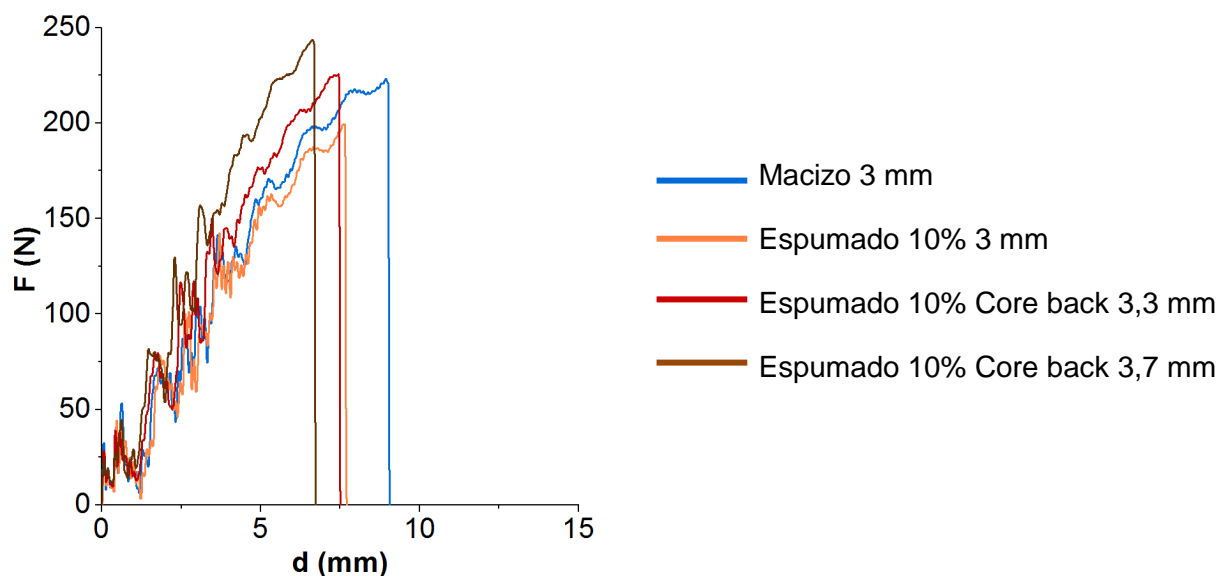


Figura 7.10. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de impacto en la dirección MD del material PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

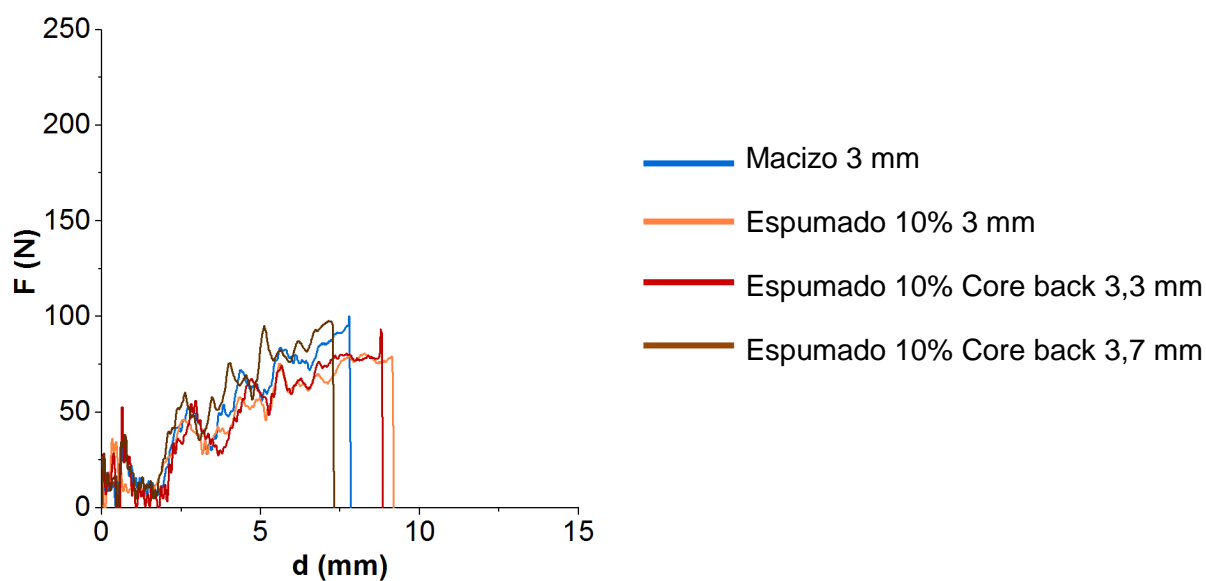


Figura 7.11. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de impacto en la dirección TD del material PP-GF30 en las diferentes condiciones de inyección

A continuación en la Tabla 7.8 de resultados se comparan los resultados de las placas microespumadas con respecto a los de las macizas.

Tabla 7.8. Resultados de resistencia al impacto (a_{cN}) del material PP-GF30 en las diferentes zonas de la placa y en las distintas condiciones de inyección

		Resistencia al impacto (a_{cN}) [kJ/m ²]						
		Macizo 3 mm	Espumado 10% 3 mm		Espumado 10% 3,3 mm		Espumado 10% 3,7 mm	
			Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]	Valor absoluto	Δ_{m-e} [%]
MD	A	28,9 ± 1,0	20,3 ± 1,9	↓30	21,2 ± 1,6	↓27	17,6 ± 1,7	↓39
	B	31,5 ± 2,3	25,7 ± 2,2	↓19	23,0 ± 1,7	↓27	20,0 ± 1,5	↓36
	C	34,9 ± 2,2	31,5 ± 3,6	↓10	28,6 ± 1,6	↓18	27,1 ± 1,4	↓22
TD	A	17,2 ± 1,9	13,0 ± 1,6	↓24	10,8 ± 0,9	↓37	8,3 ± 0,7	↓52
	B	15,3 ± 1,6	12,8 ± 1,4	↓16	7,7 ± 0,7	↓50	8,0 ± 0,8	↓48
	C	20,5 ± 2,1	15,5 ± 1,8	↓24	10,2 ± 1,1	↓50	9,6 ± 0,8	↓53

Como en el caso del PC/ABS, para el PP-GF30 también se encuentra una mayor resistencia al impacto en dirección MD que en TD. Aproximadamente entre un 40 y un 55% de diferencia.

Además la microespumación hace disminuir esta propiedad en la dirección TD, en mayor medida que en la MD cosa que también observábamos en el PC/ABS.

En este caso tampoco se observa una relación clara entre la distancia al punto de inyección de las probetas analizadas y los resultados obtenidos. Sin embargo, en la dirección MD la resistencia al impacto obtenida en zonas más alejadas del punto de inyección (zonas B y C) son mayores que las obtenidas en la zona más cercana (zona A) [33].

Esta propiedad también disminuye a medida que disminuye la densidad aparente del material, llegando a disminuir hasta un 53% en el material con menor densidad aparente. Aunque en comparación con el PC/ABS, la pérdida de propiedades es significativamente menor ya que, a igualdad de condiciones, el PP-GF30 llega a disminuir hasta un 22% menos que el PC/ABS. Esto se debe a que la adición de fibras de vidrio en el material contribuye a compensar la reducción de propiedades debida a la disminución de la densidad aparente [33].

También en este caso podemos concluir que la resistencia al impacto es la propiedad que mayor afectación tiene debida a la microespumación.

7.7. Propiedades específicas

Tal y como se había visto en el caso del PC/ABS, se ha verificado también en el PP-GF30 que tanto en el caso de los módulos de tracción y de flexión como en las deformaciones, la pérdida de propiedades está relacionada con la disminución de la densidad aparente del material (ver Figuras 7.12, 7.13 y 7.14). Además en este caso también observamos como la resistencia a la flexión de las placas espumadas (sobre todo en dirección MD), también se aproxima a la del material macizo al calcularse las propiedades específicas.

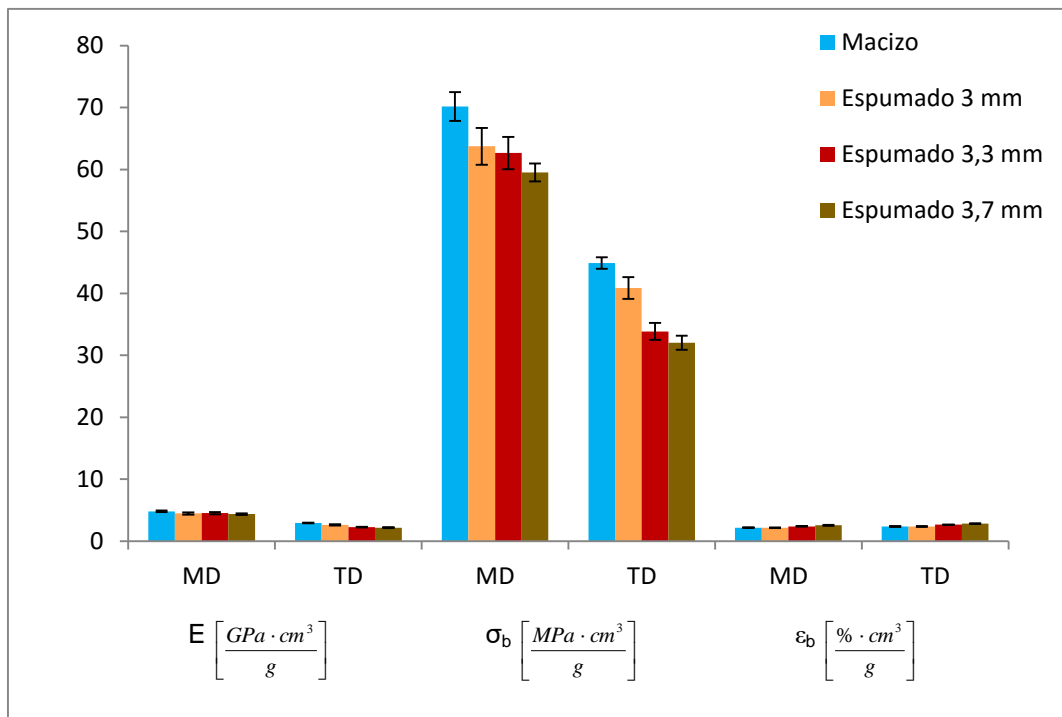


Figura 7.12. Propiedades específicas ensayos mecánicos de tracción del material PP-GF30 en las dos direcciones (MD y TD)

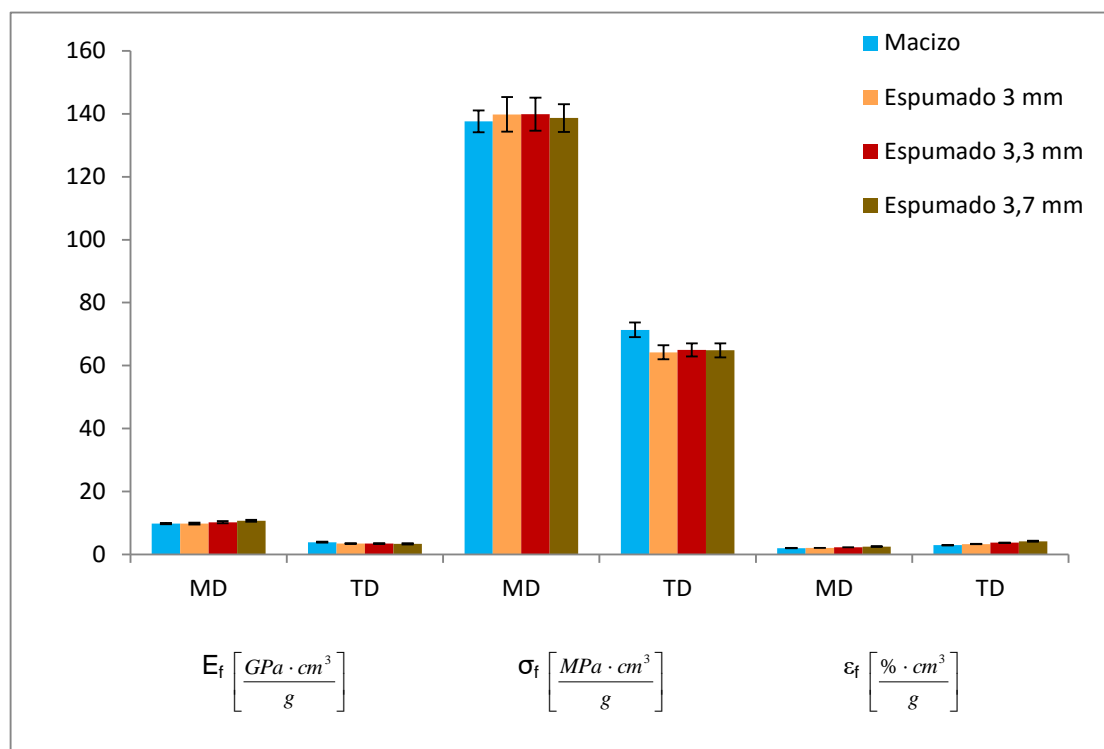


Figura 7.13. Propiedades específicas ensayos mecánicos de flexión del material PP-GF30 en las dos direcciones (MD y TD)

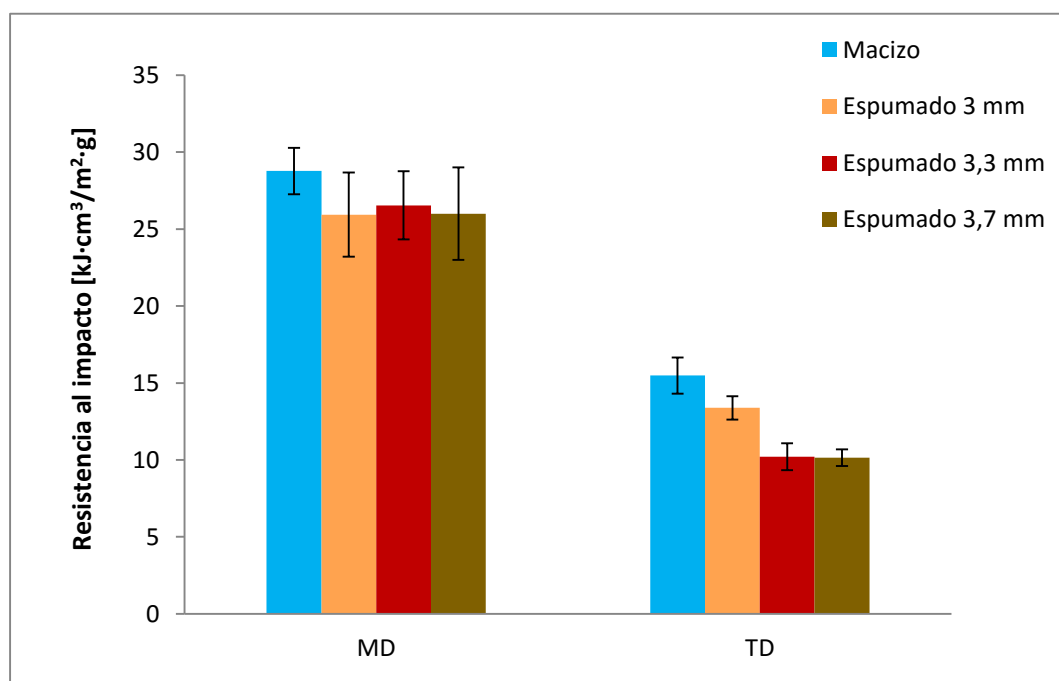


Figura 7.14. Propiedades específicas ensayos mecánicos de impacto del material PP-GF30 en las dos direcciones (MD y TD)

Conclusiones

Las principales conclusiones de este proyecto final de carrera han sido:

- En caso de querer emplearse esta tecnología para piezas vistas cabe destacar la diferencia de aspecto hallada entre las placas espumadas del material PC/ABS y las de PP-GF30. El polipropileno, aunque afectado por las ráfagas marcadas en la superficie debidas a las celdas, presenta un acabado superficial más homogéneo y regular.
- En todas las placas espumadas se observan dos zonas diferenciadas, una piel maciza y un núcleo espumado.
- Al aumentar el espesor de las placas espumadas ha podido observarse una disminución de la proporción de piel y un aumento considerable de la densidad celular.
- A través de microscopía electrónica, tanto la morfología como la estructura celular se observan de una manera más clara en el PC/ABS que en el PP-GF30. Esto es debido a que la fibra presente en el PP-GF30 enmascara la imagen.
- Se ha podido observar como en el PC/ABS la estructura celular es más homogénea. Esto es debido a que éste es un material amorfo y en el PP las regiones cristalinas del material, no permiten la creación de sitios de nucleación.
- En el PC/ABS, se han observado claras diferencias de geometrías de celdas entre diferentes zonas de las placas. Debido al arrastre del flujo durante el llenado, en las zonas más próximas a la piel de la dirección MD, las celdas pierden esfericidad y se transforman en celdas alargadas.
- La microespumación aumenta la anisotropía del material provocando una mayor pérdida de propiedades mecánicas en la dirección TD, que en la MD. Se concluye que esto es debido tanto a la morfología como a la dispersión y orientación de las celdas.
- En general, la pérdida de propiedades mecánicas debida a la microespumación se encuentra directamente relacionada con la disminución de densidad aparente del material.
- De las propiedades analizadas, la propiedad mecánica menos afectada por la microespumación es la deformación, tanto la de tracción como la de flexión.

- La propiedad que más ha disminuido con la espumación y la que más anisotropía tras la microespumación presenta es la resistencia al impacto. El material que mayor afectación tiene es el PC/ABS, ya que la fibra de vidrio presente en el PP-GF30 compensa los efectos de la espumación sobre el material.

De cara a futuras investigaciones de materiales microespumados sería interesante la verificación de las propiedades mecánicas así como el análisis de la criticidad de los resultados, sobre piezas reales y aplicables a la industria.

Agradecimientos

En primer lugar, querría darle las gracias a M^a Lluisa MasPOCH, directora del *Centre Català del Plàstic* y tutora de mi proyecto y al doctorando Javier Gómez Monterde. Sin los dos, sería imposible haber llevado a cabo este proyecto. Les agradezco las enseñanzas, los consejos, la atención y por supuesto, su comprensión y su paciencia.

También me gustaría agradecerles a los compañeros de SEAT el apoyo y los ánimos que me han dado siempre que los he necesitado. Ellos han contribuido a mantener mis ganas de seguir dedicándome al mundo de los materiales.

Y por último, pero no menos importante, me gustaría agradecerles a mis familiares, amigos y a mi pareja que en todo momento hayan estado ahí, apoyándome en todas mis decisiones, ayudándome en mis momentos de agobio y aguantándome en los de ofuscación.

Bibliografía

[1] RIBA ROMEVA, C., *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Edicions UPC. Barcelona, 2010, 277 pp., ISBN 978-84-9880-406-5.

[2] RESINEX (RAVAGO GROUP) Distribution of Plastics & Elastomers, *Productos*. España.

[<http://www.resinex.es/productos/mablex.html>]

[3] TRIPATHI, D., "*Practical guide to polypropylene*", RAPRA Technology LTD, 2002, 104 pp., ISBN 1-85957-282-0.

[4] TICONA Engineering Polymers, "*Datasheet: Celanese Celstran® PP-GF30-02 PP, 30% Glass Reinforced*". 2007.

[<http://www.hipolymers.com.ar/pdfs/celstran/datos/celstran%20PP-GF30-02.pdf>]

[5] MOLDEX3D - MOLDING INNOVATION, "*Microcellular Injection Molding (MuCell®)*".

[<http://www.moldex3d.com/en/products/solution-addons/mucell>]

[6] KLEMPNER, D. y SENDIJAREVIC, V., "*Polymeric foams and foam technology*", Hanser Publishers, Segunda Edición. Alemania, 2004, 584 pp., ISBN 1-56990-336-0.

[7] EAVES, D., "*Handbook of Polymer Foams*", Shawbury, Rapra Technology Limited. 2004, 290 pp., ISBN 1-85957-388-6.

[8] GIBSON, J. y ASHBY, M., "*Cellular solids: Structure and properties*", Segunda Edición, Cambridge University Press. Reino Unido, 1999, 532 pp., ISBN-10 0521499119.

[9] XI, Z., SHA, X., LIU, T., ZHAO, L., "*Microcellular injection molding of polypropylene and glass fiber composites with supercritical nitrogen*". Journal of Cellular Plastics, 2014, Vol. 50(5), pp. 489-505.

[10] GOMEZ-GOMEZ, J. F., *Tesis doctoral: Caracterización y estudio comparativo de materiales celulares poliméricos obtenidos mediante moldeo por inyección con espumación física o química*. UPC, 2013, 214 pp.

[11] XU, J., "*Microcellular injection molding*", Grossman y Nwabunma Editores. Estados Unidos, 2010, pp. 12-164.

[12] ROMEO, A., “*Microcellular Injection moulding: MuCell® Technology*”, Laboratorio de Diseño Avanzado. Italia, 2013, pp. 1-47.

[13] ISHIKAWA, T., OHSHIMA, M., “*Visual Observation and Numerical Studies of Polymer Foaming Behaviour of Polypropylene/Carbon Dioxide System in a Core-back Injection Molding Process*”, Polymer Engineering and Science, 2011, Vol. 51, pp. 1617-1625.

[14] TREXEL INC., “*MuCell® Process Combined With Core Back Expansion Molding Process Produces Parts With Outstanding Weight To Strength Relationships for Automotive Components*”, Omnexus. 2009.

[15] LIN, C. K., CHEN, S. H., LIOU, H. Y., TIAN, C. C., “*Study on Mechanical Properties of ABS Parts in Microcellular Injection Molding Process*”, ANTEC 2005 Plastics: Annual Technical Conference, Vol. 1: Processing, Boston, Massachusetts (USA), 2005, pp. 708-712.

[16] HEIM, H. P., “*Specialized Injection Molding Techniques*”, Plastics Design Library. USA, 2016, 262 pp., ISBN-10 0323341004.

[17] BEYDOKHTI, K., BEHRAVESH, A., AZDAST, T., “*An Experimental Study on Mechanical and Microstructural Properties of Microcellular Foams of ABS Composites*”. Universidad Tarbiat Modares, Iran, 2006, Vol. 15(7), pp. 555-567.

[18] OKAMOTO, K., “*Microcellular Processing*”, Hanser Gardner Publications, 2003, 186 pp., ISBN 1-56990-344-1.

[19] TREXEL INC., “*MuCell® Proven lightweighting technology for automotive applications*”.

[<http://www.trexel.com/images/pdfs/TrexelAutomotive.pdf>]

[20] LOZANO, A., *Entrevista a Ángel Lozano, director del Centro Español de Plásticos - El plástico en la automoción es una fuente continua de mejoras*, Centro Español de Plásticos. España, 2012.

[<http://www.cep-plasticos.com/es/contenido/entrevista-director-del-centro-espanol-de-plasticos-el-plastico-en-la-automocion-fuente-continua-de-mejoras>]

[21] BYK Additives & Instruments, “*Modifiers for Glass Fiber-reinforced Polypropylene and Polyamide*”. Germany.

[http://www.byk.com/fileadmin/byk/additives/highlights/additives_for_thermoplastics/BYK_TP-A2_GlassFiberModifiers_EN_1_.pdf]

- [22] DEL MAZO, J. M., *Los plásticos en el automóvil*, Posgrado: Carrocería y Materiales de automoción (CARMAT). UPC, 2010.
- [23] PLASTICS NEWS, *"MuCell® helps lighten VW Golf instrument panel"*. Wolfsburg, Alemania, 2012.
- [24] PLASTICS EUROPE, *"Automotive - The world moves with plastics"*. Bruselas, Belgica, 2013.
- [25] MATERIAL DATA CENTER, *"Datasheet Bayblend® T65 XF – (PC+ABS) – Covestro AG"*.

[<http://www.materialdatacenter.com/ms/en/tradenames/Bayblend/Covestro+Deutschland+AG/Bayblend%C2%AE+T65+XF/cb1c2bd5/386>]
- [26] AMCO POLYMERS, *"Datasheet Bayblend® T65 XF"*.

[<http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?l=9451&U=1&E=102716>]
- [27] BAYER, *"Datasheet Bayblend® T45, T65 and T85"*. BAYER MaterialScience, 2002.
- [28] SABIC, *"Datasheet SABIC® STAMAX 30YM240 resin"*. Arabia Saudita.
- [29] PENG, J., SRITHEP, Y., WANG, J., YU, E., TURNG, L.-S., PENG, X.-F., *"Comparisons of microcellular polylactic acid parts injection molded with supercritical nitrogen and expandable thermoplastic microspheres: Surface roughness, tensile properties, and morphology"*. Journal of Cellular Plastics, 2015, Vol. 40(5), pp. 433-444.
- [30] GÓMEZ-MONTERDE, J., SCHULTE, M., ILIJEVIIC, S., HAIN, J., SÁNCHEZ-SOTO, M., SANTANA, O. O., MASPOCH, M. LL., *"Effect of microcellular foaming on the fracture behavior of ABS polymer"*. Journal of Applied Polymer Science, 2016, Vol. 133, pp. 43010 (1-10).
- [31] GÓMEZ-MONTERDE, J., SCHULTE, M., SÁNCHEZ-SOTO, M., SANTANA, O. O., MASPOCH, M. LL., *"Efecto de la microespumación de ABS sobre el comportamiento a fractura"*. Anales de mecánica de la Fractura, 2015, Vol. 32, pp. 261-266.
- [32] GÓMEZ-MONTERDE, J., SCHULTE, M., ILIJEVIIC, S., HAIN, J., ARENCON, D., SÁNCHEZ-SOTO, M., MASPOCH, M. LL., *"Morphology and mechanical characterization of ABS foamed by microcellular injection molding"*. PROCEA ENGINEERING, 2015, Vol. 132, pp. 15-22.

[33] GÓMEZ-MONTERDE, J., SCHULTE, M., SÁNCHEZ-SOTO, M., SANTANA, O. O., MASPOCH, M. LL., “Análisis morfológico y del comportamiento a fractura de polipropileno espumado”. Anales de mecánica de la Fractura, 2016, Vol. 33, pp. 337-342.

Anexos

A. Estudio medioambiental

Para realizar el estudio medioambiental de las actividades académicas y profesionales realizadas en este proyecto, se empleará la sistemática estándar del *Centre Català del Plàstic*, donde se tiene en cuenta el consumo energético y de agua en los diferentes conceptos y su impacto en términos de hectáreas de bosque necesarias para compensar el CO₂ emitido a la atmosfera.

CONSUMO ELECTRICO

Teniendo en cuenta las siguientes premisas, podemos ver en la Tabla A.1 el resumen de consumos eléctricos que hace referencia a los diferentes equipos empleados.

Premisas:

1 kWh = 0,264 kg de CO₂

Cantidad de CO₂ absorbida por hectárea y año = 4,58 Tn de CO₂

Tabla A.1. Tabla resumen de consumos eléctricos

Equipos	Horas	Potencia [kW]	Consumo [kWh]
Fresadora	22	1	22
SEM	16	10	160
Máquina de tracción	12	1,6	19,2
Máquina de ensayos universal	18	1,25	22,5
Máquina de impacto	8	1	8
Fluorescentes	600	0,05	30
Ordenadores	350	6,2	2170

TOTAL ESTIMADO: 2431,7 kWh → 642 kg de CO₂ → 0,14 hectáreas de bosque

Esta estimación está calculada con la potencia máxima de cada máquina, por lo que para obtener el valor real de consumo, deberemos aplicarle un coeficiente de 0,4.

TOTAL ESTIMADO: 972,7 kWh → 256,8 kg de CO₂ → 0,06 hectáreas de bosque

CONSUMO DE AGUA

En las Tabla A.2, puede observarse la estimación del consumo de agua a lo largo del proyecto.

Tabla A.2. Tabla resumen de consumo de agua

Equipos	Horas	Caudal [m³/h]	Consumo [m³]
Grifos	3	0,4	1,2

TOTAL ESTIMADO: 1,2 m³

MOVILIDAD

Teniendo en cuenta las siguientes premisas, en la Tabla A.3 puede encontrarse el consumo estimado de energía asociada a la movilidad.

Premisas:

1 litro gasolina = 40MJ; 1 litro de gasolina = 0,88 kg CO₂

Coche = 2,98 MJ/km

Cantidad de CO₂ absorbida por hectárea y año = 4,58 Tn de CO₂

Tabla A.3. Tabla resumen consumo de energía en movilidad

Medio de transporte	km	MJ/km	MJ	Consumo [l]
Coche	1200	2,98	3576	89,4

TOTAL ESTIMADO: 89,4 l de gasolina → 78,7 kg de CO₂ → 0,017 hectáreas de bosque

A partir de estos cálculos previos, en la Tabla A.4, se puede observar un resumen con la estimación de todos los consumos llevados a cabo en el proyecto que tienen una implicación sobre el medio ambiente.

Tabla A.4. Tabla resumen consumos

Concepto	Unidades	Cantidad	kg CO ₂	Hectáreas
Consumo eléctrico	kWh	972,7	256,8	0,06
Consumo agua	m ³	1,2	---	---
Movilidad	MJ	3576	78,7	0,017
Residuos ⁽¹⁾	kg	5	7,5	0,002
Plástico ⁽²⁾	kg	25	87,5	0,019
Nitrógeno	kg	3	---	---
TOTAL ESTIMADO	---	---	456,7	0,104

⁽¹⁾ 1 kg de residuos = 1,5 kg de CO₂

⁽²⁾ 1 kg de plástico = 3,5 kg de CO₂

B. Presupuesto

Para realizar un presupuesto y hacer una estimación de costes de lo que ha supuesto llevar a cabo este proyecto en el *Centre Català del Plàstic* se tendrán en cuenta los siguientes conceptos:

- Coste uso maquinaria
- Coste ingeniería

El coste de la inyección no se tendrá en cuenta puesto que no entraba dentro del alcance de este proyecto.

COSTE USO DE MAQUINARIA

Toda la parte experimental se ha realizado entre el CCP y la UPC, los costes por lo tanto, se ajustaran a las tarifas de estos centro. Estas tarifas incluyen la mano de obra cualificada, la amortización del equipo y el coste energético asociado a estos. En la Tabla B.1, puede observarse el desglose de los diferentes costes de las maquinarias.

Tabla B.1. Tabla de costes por el uso de las maquinarias

Ensayos		Coste unitario [€]	Cantidad	Coste [€]
Obtención de probetas	Corte de probetas	120 €/serie	64 series	7680
	Tracción	240 €/1ª serie	21 series	3240
Ensayos de laboratorio	Flexión	150 €/resto series	21 series	3240
	Impacto		21 series	3240
Microscopia	SEM	180 €/hora	16 horas	2880
TOTAL	---	---	---	20280

COSTES DE INGENIERÍA

En la Tabla B.2, se detallan las horas de trabajo de ingeniería dedicadas a cada una de las tareas principales llevadas a cabo durante el proyecto.

Tabla B.2. Costes de ingeniería

Concepto	Coste unitario [€/h]	Cantidad [h]	Coste [€]
Estudio previo	20	60	1200
Experimentación	20	250	5000
Análisis de resultados	20	150	3000
Documentación	20	250	5000
TOTAL	---	---	14200

A partir de estos datos, en la Tabla B.3 puede observarse un resumen del total de los gastos asociados al proyecto.

Tabla B.3. Tabla resumen de costes

Concepto	Coste [€]
Coste de maquinaria	20280
Coste de ingeniería	14200
TOTAL	34480